МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Л. И. Крынин

Основы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния

Учебное пособие



Санкт- Петербург
2008

Крынин Л. И., – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 124 с.

На основе анализа и систематизации конструкций отечественных и зарубежных моделей объективов с позиции обеспечения необходимой точности положения и позиционирования оптических компонентов сформулированы основные принципы проектирования объективов переменного фокусного расстояния.

Для студентов вузов и инженерно-технических работников предприятий, выпускающих объективы.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

ВВЕДЕНИЕ

В последние года объективы с переменным фокусным расстоянием стали неотъемлемой частью абсолютного большинства моделей фото-, кино- и видеоаппаратов.

Столь широкое распространение этих объективов объясняется тем, что они обладают рядом значительных преимуществ по сравнению с объективами постоянного фокусного расстояния, к которым следует отнести:

– возможность подбора оптимальной композиции кадра без изменения точки съема;
– создание, так называемого, эффекта «наезда» и «отъезда» без относительного перемещения аппарата и снимаемых объектов;
– повышение оперативности и удобства работы при эксплуатации;
– заметное уменьшение общих габаритов и веса.

С каждым годом параметры объективов переменного фокусного расстояния совершенствуются:

– увеличивается уровень кратности изменения фокусных расстояний в одной модели до $35 \div 50^X$;
– возрастает светосила объективов как за счет увеличения относительного отверстия до значений 1:1,2÷1:1,0, так и за счет повышения коэффициента пропускания;
– уменьшается значение ближайшей дистанции съемки (объективы с «макрозумом» позволяют осуществлять съемку объективов, расположенных вплотную к оправе объектива;
– уменьшаются габариты и вес объективов;
– повышается качество изображения.

Анализ тенденций развития объективов с переменным фокусным расстоянием показывает, что в будущем следует ожидать как дальнейшего развития параметров объективов, перехода рекордных, присущих лишь отдельным моделям в рядовые, так и совершенствование схем и конструкций типовых объективов в направлении значительного повышения качества изображения.

Являясь наиболее сложным узлом в расчетном, конструктивном и производственном плане, объектив, в основном, определяет как сроки освоения новых моделей, так и общую трудоемкость производства съемочной камеры.

Все изложенное обуславливает необходимость всемерного усиления внимания к вопросам разработки и массового применения объективов переменного фокусного расстояния.

К настоящему времени по теории и методике расчета оптических систем с переменным фокусным расстоянием опубликовано значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, в то же время вопросы конструктивного устройства и технологии производства объективов переменного фокусного расстояния практически нигде не освещены кроме нескольких работ общего характера.

Так Цуккерман С.Т. [1], Уэрмишам А.У. [2], Бардин А.Н. [3], Новик Ф.С. [4], Плотников В.С. [5] и др. рассмотрели в своих трудах принципиальную схему объективов с переменным фокусным расстоянием, дали описание ее работы и высказали ряд замечаний о необходимости более точного их изготовления по сравнению с объективами постоянного фокусного расстояния.

Чуриловский В.Н. [6] исследовал теоретическую схему инверсорного панкратика и рассмотрел его принципиальное конструктивное решение без анализа на точность, технологичность и т.д.

Литвин Ф.Л. [7] дал методику силового расчета в объективе с механической компенсацией с аксиальным расположением подвижных оправ.

По панкратическим зрительным трубам имеется оригинальная работа Погорева Г.В. [8] в которой впервые подробно затрагиваются вопросы юстировки панкратической системы с механической компенсацией, указываются основные погрешности, влияющие на выходные параметры зрительных труб, рассматривается методика их выявления, компенсации и связь с выходными параметрами.

Основными источниками сведений о конструкциях объективов переменного фокусного расстояния являются патентные материалы, заводская документация и образцы объективов. Все эти источники дают разрозненные сведения о конструкциях и их отдельных элементах, не содержат никакого анализа или обобщений и рекомендаций, способствующих рациональному выбору конструкций и организации рациональных технологических процессов изготовления новых образцов.

Проектирование объективов носит субъективный характер и в большинстве случаев зависит от личного производственного опыта и профессиональных навыков проектировщика. Единых методов проектирования объективов не существует.

В то же время объективы переменного фокусного расстояния в конструкторском и производственном плане для условий серийного и массового производства представляют собой сложные оптико-механические системы, в которых, кроме присущих всем объективам конструкторско-производственных задач, приходится решать ряд дополнительных вопросов:

– обеспечение точного взаимного перемещения оптических компонентов (погрешность взаимного расположения компонентов составляет 0,01-0,03 мм);
– стабильность центрировки при изменении положения компонента (0,015-0,05 мм);
– обеспечение постоянства положения плоскости изображения при всех изменениях фокусного расстояния (0,015-0,03 мм);
– обеспечение минимальных затрат времени, необходимых для проверки качества изображения на различных значениях фокусного расстояния;
– достижение простоты, удобства сборки и юстировки и др.

Чем выше исходные параметры объектива (требуемое качество изображения, относительное отверстие, кратность изменения фокусного расстояния и др.), тем сложнее схема и конструкция объектива и критичность его к решению упомянутых проблем.

Во многом полнота и правильность решения этих проблем связана с наличием производственных методов точностного анализа, которые обоснованно отражали бы не только фактическое положение оптического элемента в конструкции объектива, но и реальные возможности производства. Таким требованиям отвечают теоретико-вероятностные методы расчетов.

1. Обзор и анализ типовых конструкций объективов переменного фокусного расстояния

1.1. Принципы устройства

Появление первых объективов переменного фокусного расстояния относится к концу XIX века [9]. Это были преимущественно системы дискретного изменения фокусного расстояния.

Объективы плавного изменения фокусного расстояния появились в 20-е годы XX столетия [10]. Систематические исследования этих объективов как у нас, так и за границей начинаются в 30-е годы. К концу 50-х за рубежом они заметно потеснили объективы дискретного изменения фокусного расстояния.

В нашей стране широкий фронт работ по проектированию и изготовлению объективов переменного фокусного расстояния развернулся в конце 50-х начале 60-х годов, когда отечественная промышленность

приступила к выпуску любительской кинотехники на 8-мм формат пленки. Первые отечественные объективы переменного фокусного расстояния для киносъемочной аппаратуры, рассчитанной на 8-мм формат, были освоены в серийном производстве в 1963-64гг.: ПФ-2 для киноаппарата «Лада», «Метеор-2» - для киноаппарата «Кварц-3».

Основной специфической задачей, которая решается при выборе и расчете оптической схемы объективов переменного фокусного расстояния является обеспечение постоянства расположения плоскости изображения при изменении фокусного расстояния. Решить эту задачу возможно лишь при условии одновременного перемещения двух или более компонентов объектива и нелинейной зависимости взаимных перемещений этих подвижных компонентов (рис.1.1). Оптические системы переменного фокусного расстояния, в которых выполняются эти условия, получили название систем с механической компенсацией плоскости изображения.

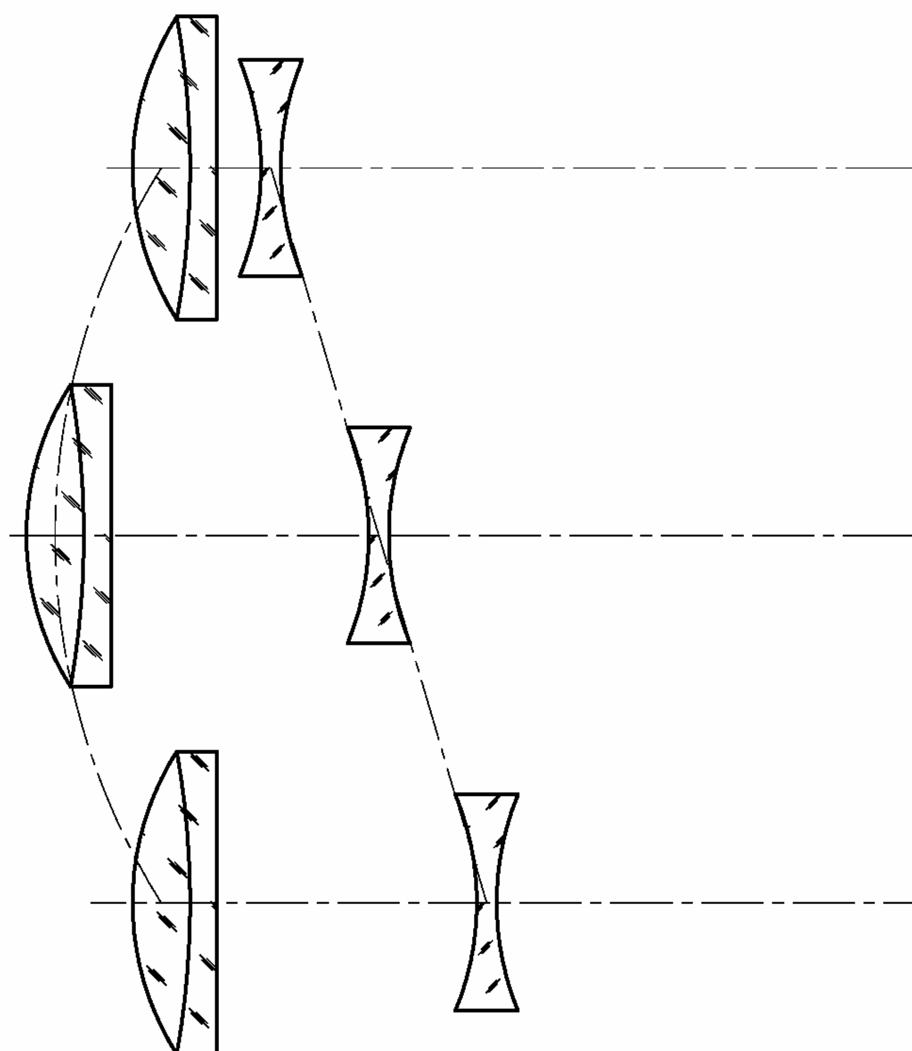


Рис. 1.1. Система с механической компенсацией сдвига плоскости изображения

Технологическая сложность исполнения конструкций объективов с механической компенсацией, обусловленная нелинейными зависимостями взаимных перемещений подвижных оптических компонентов, предопределила поиск и создание другой системы, в которой изменение фокусного расстояния и обеспечение постоянства плоскости изображения достигается перемещением жестко связанных между собой подвижных компонентов, относительно чередующихся с ними неподвижных компонентов. Такие системы называются системами с оптической компенсацией сдвига плоскости изображения (рис.1.2).

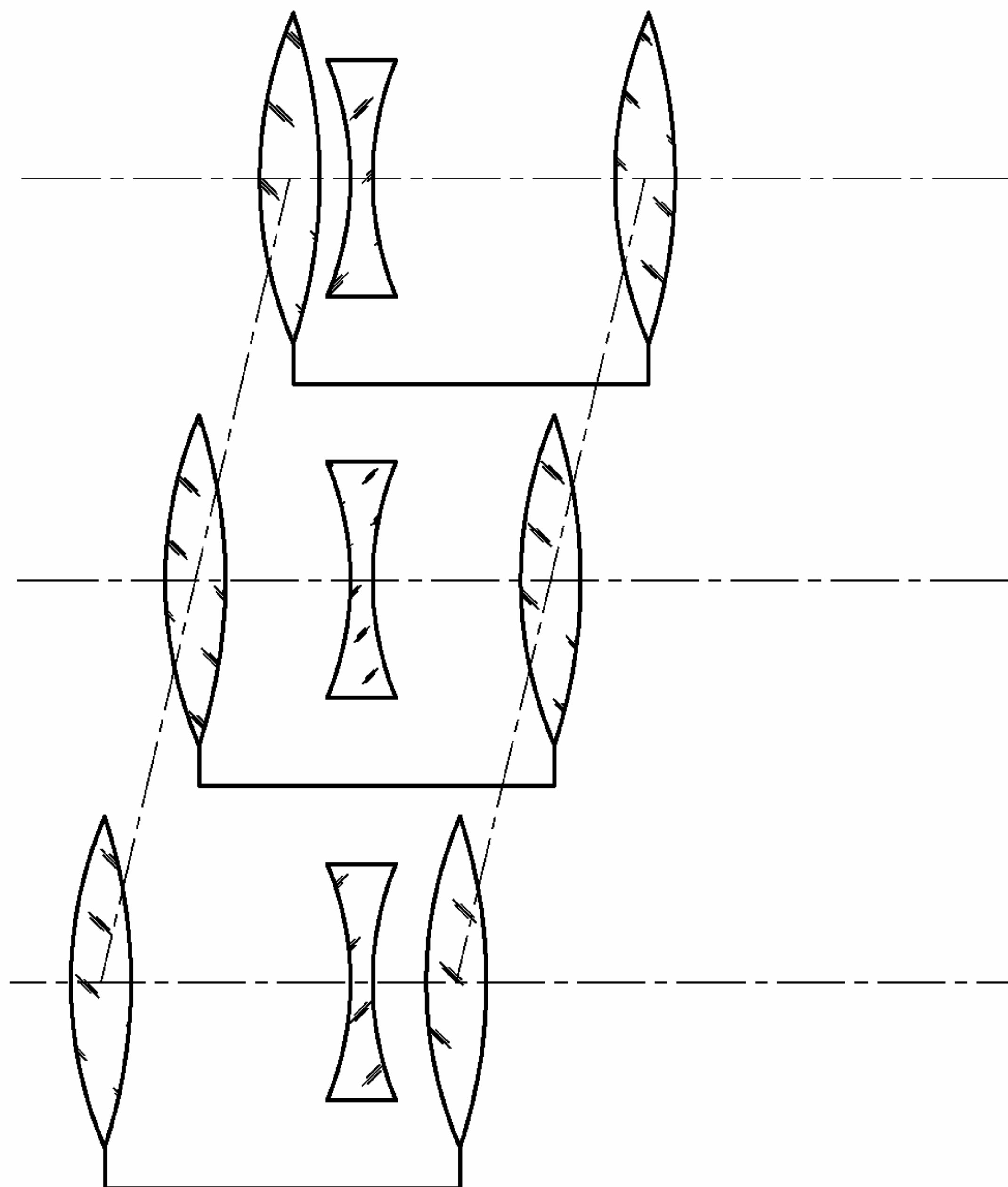


Рис. 1.2. Система с оптической компенсацией сдвига плоскости изображения

Рассматривая кинематические и оптические схемы объективов, следует выделять в них три основных узла: насадку Н афокальную в трансфокаторах и неафокальную в вариообъктивах, призму или зеркало П и собственно объектив О (рис.1.3).

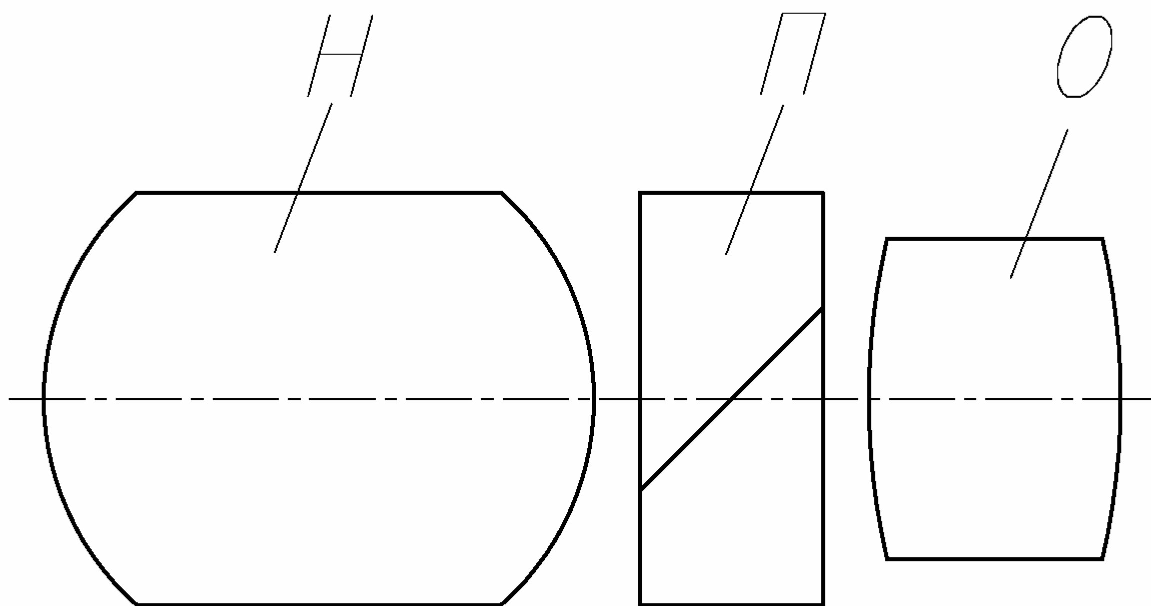


Рис. 1.3. Поузловая схема объектива

Насадка предназначается для изменения увеличения, компенсации сдвига плоскости изображения, фокусировки объектива и частичной коррекции аберрации; призма (зеркало) служит для отвода части светового потока в визирное, а иногда, в экспонометрическое устройство; задача «собственно» объектива сводится в основном к построению изображения в кадровом окне фильмового канала и коррекции остаточных аберраций.

1.2. Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с механической компенсацией

Напомним, у объективов с механической компенсацией перемещение подвижных компонентов происходит по различным законам, связанным между собой нелинейной зависимостью. В этом случае обеспечивается наилучшее постоянство расположения плоскости изображения. Кроме того, объективы с механической компенсацией имеют значительно меньшие габариты при больших перепадах фокусного расстояния, меньшее количество оптических элементов по сравнению с объективами с оптической компенсацией и т.д.

По этим причинам объективы с механической компенсацией получили в настоящее время преимущественное распространение.

При разработке конструкции объектива основными задачами, решаемыми в процессе проектирования, являются: обеспечение стабильности и точности положения подвижных компонентов; выбор способов крепления и сопряжения компонентов исходя из условия достижения необходимой точности и технологичности конструкции; достижение минимальных усилий для перемещения подвижных компонентов и др. В зависимости от того, каким путем решаются эти проблемы все конструкции могут быть разделены на два типа:

– объективы с кулачковыми механизмами;
– объективы с рычажными механизмами.

В конструкциях с кулачковыми механизмами нашли применение два вида кулачков: цилиндрические и дисковые.

В конструкциях с рычажными механизмами используются инверсорные устройства и специальные рычажные устройства.

По видам направляющих поступательного движения конструкции объективов могут быть разделены на устройства с использованием винтовых аксиальных (соосных с оптической осью объектива) оправ, винтовых неаксиальных стержней и оправ, гладких цилиндрических аксиальных оправ, гладких неаксиальных втулок и стержней.

Механизмы с цилиндрическими кулачками и направляющие в виде аксиальных цилиндрических оправ позволяют создавать компактные и малогабаритные конструкции объективов. Механизмы с дисковыми кулачками в отличии от устройств с цилиндрическими кулачками, дают возможность применять более простые методы обработки (например, вырубка). Но их использование при любых видах известных направляющих устройств и при прочих равных условиях всегда ведет к увеличению габаритов конструкций объективов.

Несмотря на то, что кулачковые механизмы обладают рядом достоинств (воспроизведение требуемых математических функций, получение относительно небольших габаритов и др.), все они сравнительно сложны в производстве. Эта сложность обуславливается требованием высокой

точности получения профилей кулачков (0,02-0,03 мм), а при использовании цилиндрических кулачков к тому же необходимостью обеспечения точного взаимного расположения криволинейных пазов, количество которых в объективе может достигать шести.

Факт периодического появления в технической, в частности патентной, литературе сведений о различных типах рычажных устройств обуславливается, видимо, привлекательностью технологической простоты их изготовления. В качестве примера можно привести сообщение фирмы Буш [11] о расчете с помощью ЭВМ устройства, которое обеспечивает перемещение оптических компонентов по заданным законам с точностью до 0,025 мм. К сожалению, о практической реализации этого механизма никаких сведений найти не удалось.

Приведенное выше деление позволяет проводить систематизацию конструкций объективов и дает достаточное представление о главных их особенностях. Дальнейшее изложение материала ведется в соответствии с этим делением, при этом рассматриваются конструкции, отражающие наиболее характерные этапы развития объективов переменного фокусного расстояния.

1.2.1. Конструкции объективов с использованием цилиндрических кулачков

Одной из первых попыток использования цилиндрических кулачков в киносъемочном объективе явилась конструкция (рис.1.4), созданная А.Уэрмишемом в 1931г. [12].

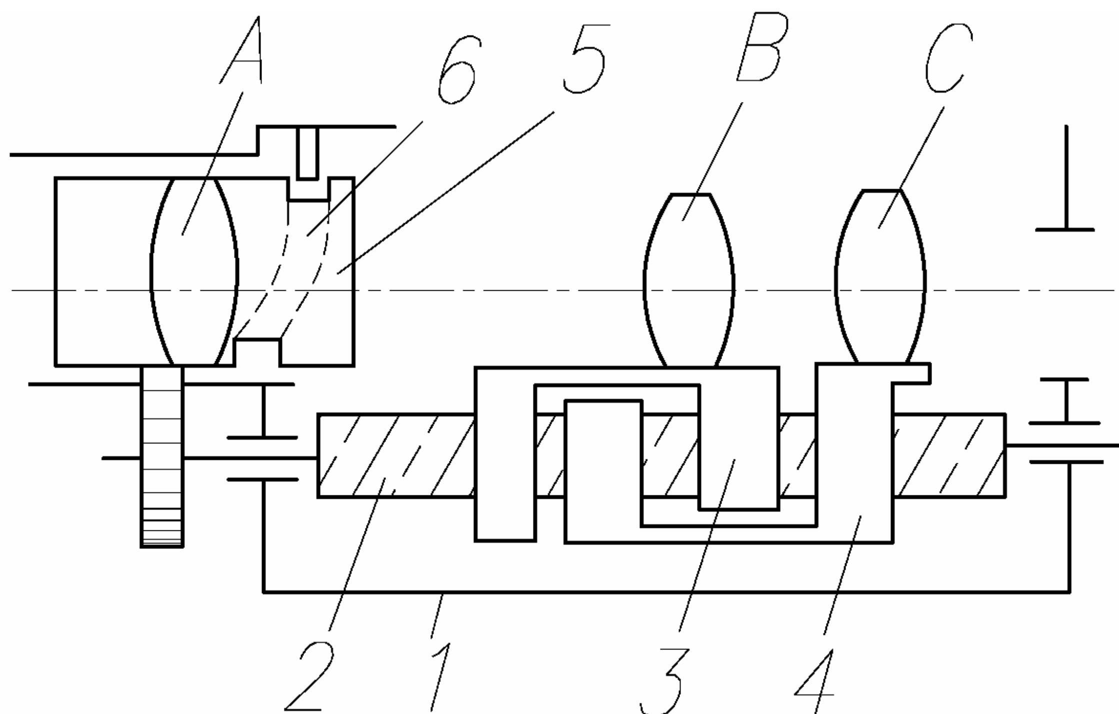


Рис. 1.4. Конструкция Уэрмишема

Для осуществления изменения фокусного расстояния в ней вращают рукоятку, расположенную на корпусе аппарата (на рис.1.4 не показана); при этом происходит совместное перемещение оправ 3, 4 с компонентами *B* и *C* вдоль винта 2 и оправы 5 с компонентом *A* вдоль цилиндрической направляющей в корпусе 1. Криволинейный паз 6 в оправе 5 служит для придания компоненту *A* заданного закона перемещения.

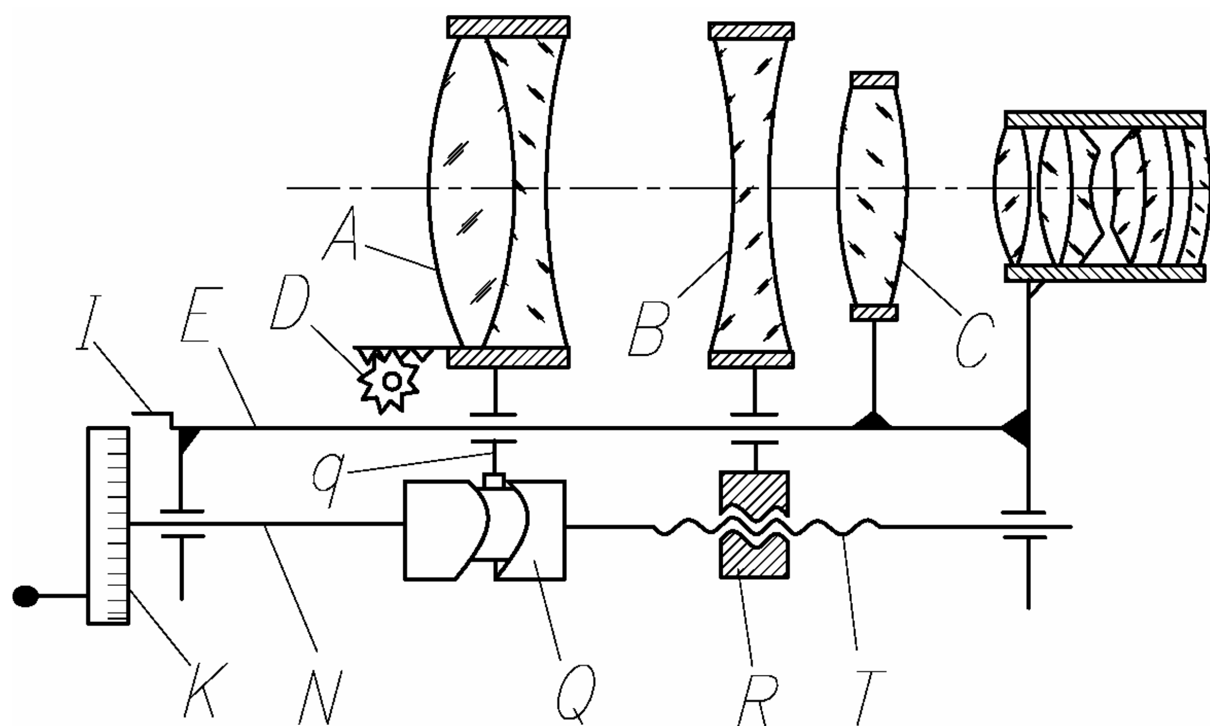


Рис. 1.5. Конструкция Капстофа

Развитием этой конструкции можно считать трансфокатор Капстофа [13] (рис.1.5). В этой конструкции изменение увеличения афокальной насадки, состоящей из компонентов *A, B, C* достигалось следующим образом. Вращением рукоятки *K* со шкалой увеличений или фокусных расстояний движение передавалось на стержень *N* с пазовым кулачком *Q* и резьбой *T*. При этом оправа *R* компонента *B* перемещалась вдоль стержня *N*, а компонент *A*, щуп *q* которого входил в паз кулачка *Q*, перемещался по заданному нелинейному закону.

Фокусировка осуществлялась компонентом *A* с помощью реечного зацепления *D*; *K* и *I* – соответственно шкала дистанций и указатель.

По сравнению с конструкцией Уэрмишема в этом объективе имеется несколько новых решений.

Во-первых, элементы, перемещающие оптические компоненты по нелинейной и линейной зависимости, сведены в один узел-стержень *N*. Это позволяет исключить ошибки передачи между элементом и криволинейным пазом и элементом, обеспечивающим прямолинейное

движение компонентов, исключить ошибки относительного расположения винта и детали с кулачковым пазом.

Во-вторых, если в конструкции Уэрмишема функции направляющего и силового элемента выполняет винт 2, то у Капстофа эти функции поделены соответственно между стержнями *E* и *N*, что позволяет снизить требования к точности изготовления винта и к точности его выставки относительно оптической оси прибора.

В-третьих, все оптические компоненты *A, B, C* насадки базируются на одном элементе – стержне *E*. В конструкции Уэрмишема базой для компонента *A* является корпус, для компонентов *B* и *C* – винт.

Интересен другой тип конструкции (рис.1.6), предложенный Н.Науманном в 1931г. [14]. При изменении фокусного расстояния, вращение цилиндра 1 за некатаную часть 1′ передается оправе 2 с криволинейными пазами, два из которых 8, 9 нарезаны по цилиндрической

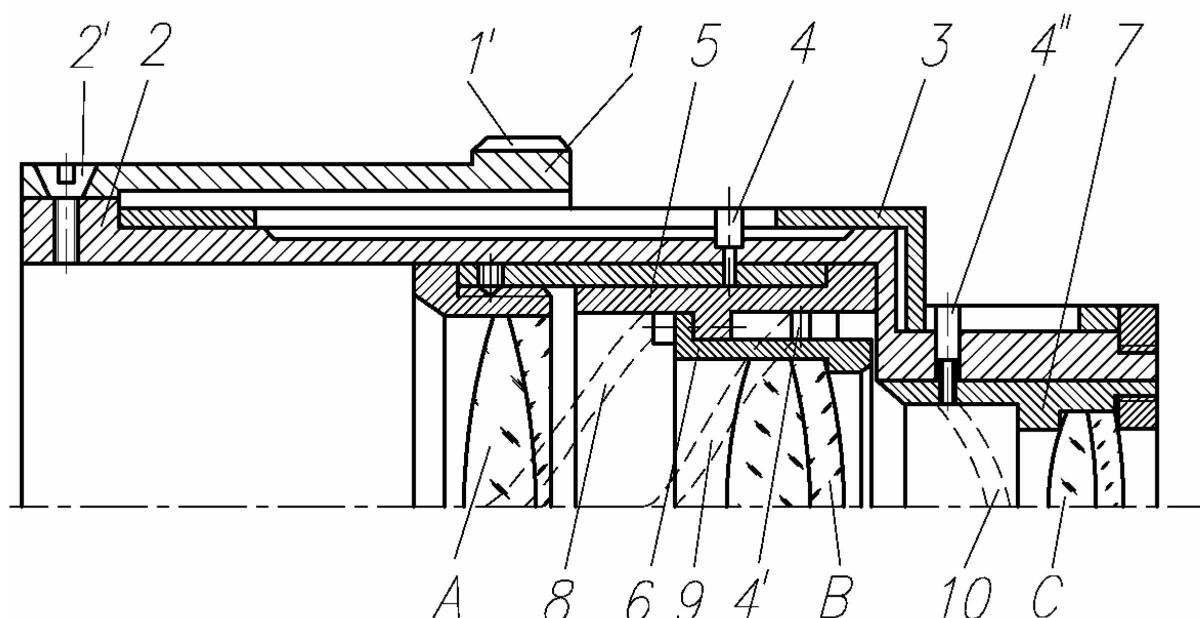


Рис. 1.6. Конструкция Наумана: 1 – цилиндр; 1' – накатка; 2 – оправа; 2' - винт; 3 – корпус; 4, 4', 4" – пальцы; 5, 6, 7 – оправы подвижных компонентов A, B, C; 8, 9, 10 – криволинейные пазы

винтовой линии одного шага, а третий 10 – по закону, позволяющему компенсировать сдвиг плоскости изображения при изменении фокусного расстояния. Оправа 2 соединена с цилиндром 1 винтом 2′. В пазы оправы 2 входят пальцы 4, 4′, 4″, закрепленные в оправах 5, 6, 7. Вращение оправы 2 вызывает перемещение пальцев по криволинейным пазам. При этом оправы 5, 6, 7 с компонентами *A, Б, C* движутся вдоль оптической оси. Для устранения вращения оптических компонентов пальцы 4, 4′, 4″ входят в прямолинейные пазы корпуса. В этой конструкции перемещения всех трех компонентов осуществляется вращением одной оправы 2.

Здесь, как и в предыдущей конструкции, элементы, определяющие законы перемещения компонентов (пазы), сведены в один узел –

цилиндрическую оправу 2. Но если в конструкции Капстофа это узел (стержень *N*) является и силовым элементом, а роль направляющего выполняет стержень *E*, то в конструкции, предложенной в [14], оправа 2 выполняет одновременно функции управления и направления. Это, безусловно, сокращает количество деталей и позволяет значительно уменьшить габариты объектива и повысить точность взаимного расположения компонентов.

Этот тип конструкции нашел самое широкое распространение во всем мире, в том числе и в отечественных объективах («Агат-14», «ПФ-3», «Агат-6А»).

В качестве примера (рис.1.7) приведена схема объектива «Агат-14». При изменении фокусного расстояния, вращение цилиндрического кулачка 3 передается оправам 4 и 5 с компонентами *Б* и *В*. Компонент *Б* перемещается по криволинейному пазу, компонент *В* – по винтовому.

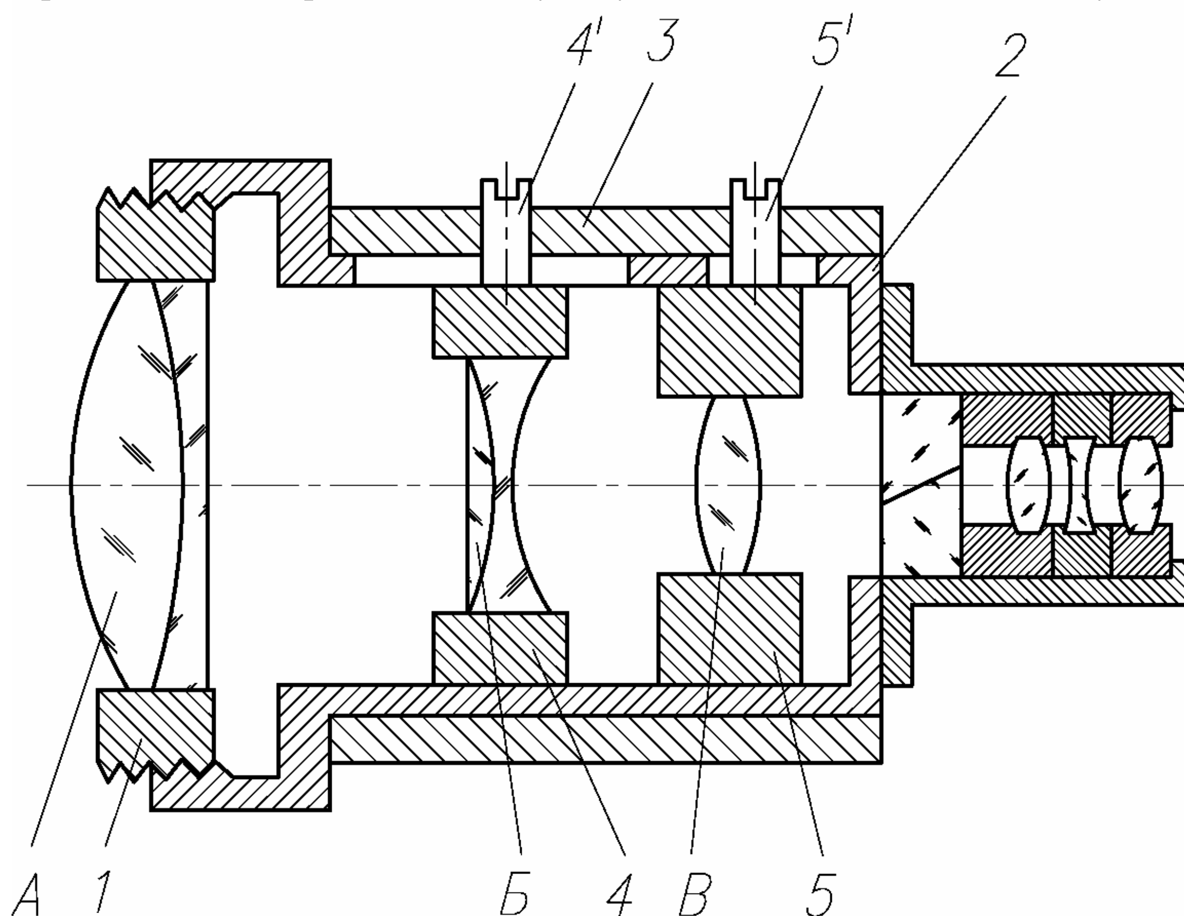


Рис. 1.7. Объектив "Агат-14": 1 – оправа первого компонента; 2 – корпус; 3 – кулачок; 4, 5 – оправы подвижных компонентов; 4', 5' – пальцы

Для устранения вращения оптических компонентов пальцы 4′ и 5′ входят в прямолинейные пазы корпуса 2. Установка дистанции осуществляется перемещением компонента *А* по резьбе в корпусе 2.

Дальнейшее развитие конструкции объективов с механической компенсацией шло в основном по пути усовершенствования схемы, в которой криволинейные пазы нарезались на одной цилиндрической

оправе. В связи с этим необходимо отметить интересную конструкцию, разработанную Анженье в 1954г. [15] (рис.1.8).

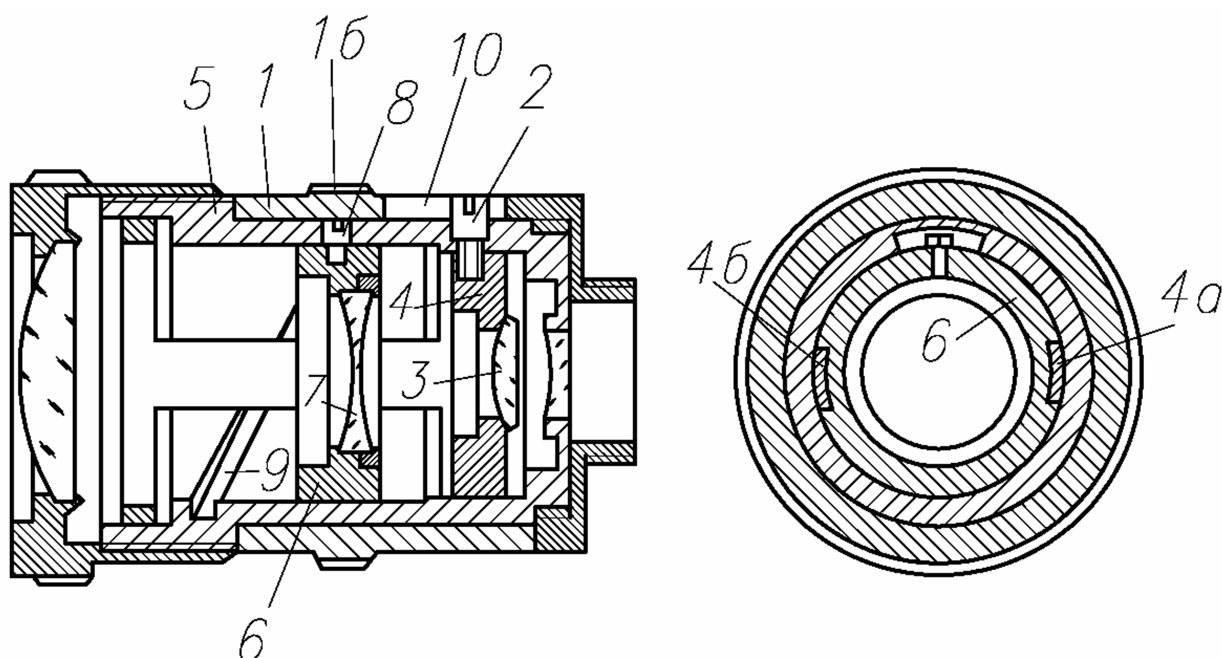


Рис. 1.8. Конструкция Анженье

Изменение увеличения достигается здесь вращением оправы 1 за накатанную часть 1б; при этом паз 1а через палец 2 перемещает оправу 4 с линзой 3 вдоль оптической оси по криволинейному пазу (не указанному на рис.1.8) в детали 5. При своем перемещении вдоль оптической оси оправа 4 вращается. Это вращение через отводы 4а и 4б передается оправе 6 с линзой 7 и винтом 8. Винт 8 входит в паз 9 оправы 5, поэтому при вращении оправа 6 одновременно перемещается вдоль оси объектива. Интересно отметить, что применяемое конструктивное решение оправы 4 позволяет значительно уменьшить заклинивание и перекос линзы 3 и, следовательно, применить один направляющий криволинейный паз вместо трех через 120°, как это сейчас широко распространено. Кроме того, это решение позволяет одновременно решить задачу перемещения оправы 6 с линзой 7. Применение несквозного внутреннего паза 9 ограничит попадание в него пыли и грязи, что положительно сказывается на точности работы конструкции и уменьшении возможности заедания подвижного компонента.

1.2.2. Конструкции объективов с использованием дисковых кулачков

Как уже отмечалось, наряду с цилиндрическими кулачками в объективах переменного фокусного расстояния нашли применение дисковые кулачки.

Одной из первых конструкций объектива с использованием дискового кулачка следует назвать устройство, спроектированное Уолкером в 1929г. [16]. Конструкция отличалась большими габаритными размерами и

массой. Для согласования перемещений компонентов использовались конические и реечные зубчатые зацепления. Направляющими для компонентов служили гладкие цилиндрические стержни, фокусирующие устройства отсутствовали. Из более поздних разработок наибольший интерес представляет конструкция Кецнике (Австрия), разработанная им в 1959г. [17] и конструкция Мартина (США), разработанная в 1960г. [18].

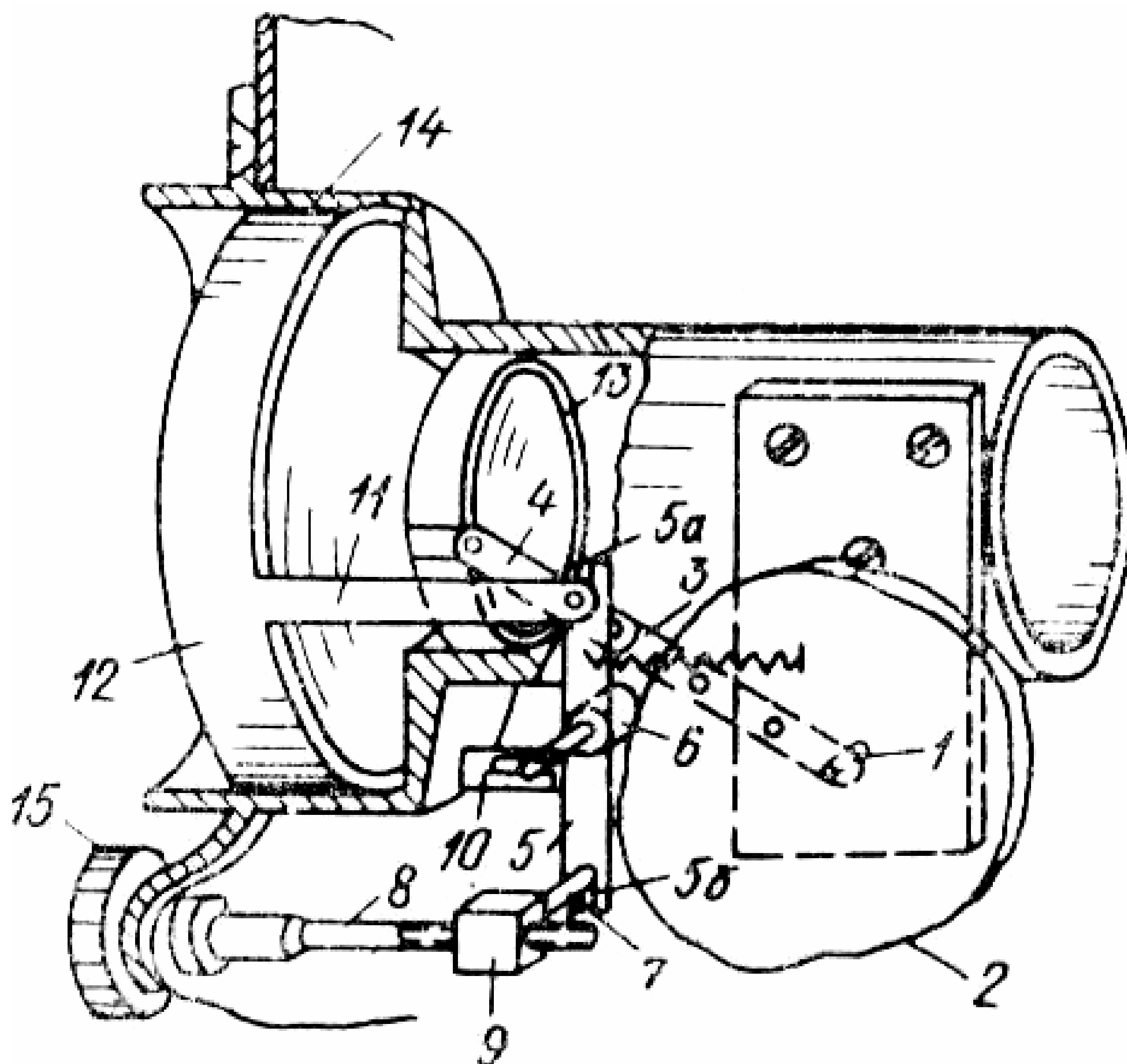


Рис. 1.9. Конструкция Кецнике

На рис.1.9 изображен механизм перемещения компонентов в объективе Кецнике. При изменении фокусного расстояния вращение кулачка 2 вокруг оси 1, жестко связанной с кулачком, через рычаг 3 и рычаг 4 передается оправе 13 со вторым компонентом, который перемещается по линейному закону в направляющей 14. Вращение кулачка 2 вызывает перемещение щупа 6 в направляющей 10, параллельно оптической оси. Рычаг 5 поворачивается вокруг неподвижного пальца 7, входящего в паз

5б. На другом конце рычага находится паз 5а, в который входит палец выступа 11 оправы 12 первого компонента, перемещающегося при развороте рычага 5 по гиперболическому закону. Для фокусировки объектива вращают рукоятку 15, жестко связанную с винтом 8, при этом перемещается гайка 9 со стержнем 7. Рычаг 5 разворачивается вокруг точки контакта щупа 6 и кулачка 2, вызывая перемещение паза 5а и связанного с ним выступа 11 оправы 12 с первым компонентом.

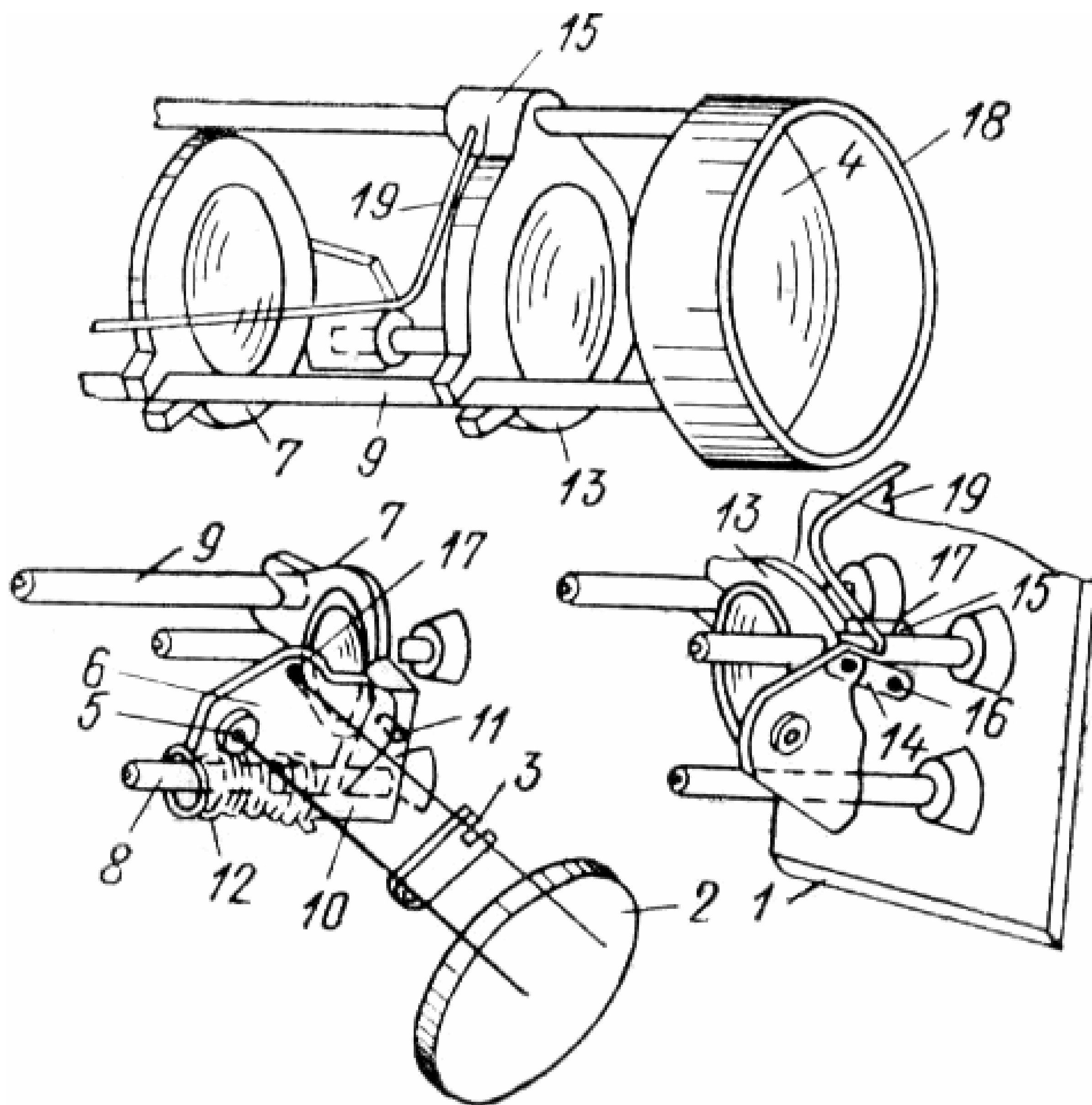


Рис. 1.10. Конструкция Мартина

На рис.1.10 изображен механизм перемещения компонентов в объективе Мартина. Основным достоинством этой конструкции является то, что она позволяет прилагать значительно меньше усилия для перемещения, чем в предыдущем варианте; обеспечивать большую плавность хода при той же и даже меньшей длине направляющих. Объясняется это тем, что величина плеча приложения силы в этом варианте обычно в несколько раз (5-8)

меньше, чем в варианте с направляющими аксиального типа. Для изменения фокусного расстояния вращается рукоятка 2 и жестко связанный с ней рычаг 3, в паз которого входит палец 17 кулачка 6. На пальце 17 крепится рычаг 14. При вращении кулачка 6 вокруг оси 5 движение через рычаг 14 и палец 16 передается оправе 13 со вторым компонентом. Рычаг 19, укрепленный в направляющей 15 оправы 13, передает движение второму компоненту от двигателя аппарата (пружинного или электрического). Перемещение третьего компонента происходит следующим образом. При вращении кулачка 6 щуп 11, закрепленный на направляющей 10 оправы 7, скользит вдоль профильной поверхности кулачка, вызывая перемещение оправы 7 с третьим компонентом вдоль направляющих пинолей 9 и 8. Для постоянного контакта между щупом 11 и кулачком 6 на пиноли 8 навита пружина 12, один конец которой закреплен на направляющей 10 оправы 7, а другой крепится на оправе 18. Фокусировка осуществляется вручную перемещением оправы 4 с первым компонентом в оправе 18. Сравнивая конструкции объективов Кецнике и Мартина, можно заметить, что принципиальная разница между ними заключается в выборе направляющих элементов. Если в конструкции Кецнике это цилиндрическая оправа, то в конструкции Мартина для направления движения оптических компонентов используются пиноли. Безусловно, изготовление пинолей проще, чем сложной оправы 14, а базовая пластина 1 и оправа 8 могут быть получены штамповкой из листового материала. Кроме того, необходимо отметить в конструкции Мартина более удачное конструктивное решение узла кулачка и компонента, перемещающегося по нелинейному закону. Оно исключает все зазоры и связанные с ними мертвые хода в сопряжениях, влияющих на положение подвижного компонента. В конструкции Кецнике при реверсивном перемещении компонента 12 на точность его установки будет сказываться зазор в сопряжении кольца оправы 11 и паза 5а. И все же в конструкции с пинолями точность расположения оправ относительно оптической оси зависит от большого количества факторов, чем в конструкции с одной направляющей оправой.

1.2.3. Конструкции объективов с использованием рычажных механизмов

Использование рычажных механизмов для объективов переменного фокусного расстояния в отечественной съемочной аппаратуре еще не имело место. За рубежом запатентовано несколько вариантов таких конструкций и, в частности инверсорных. Как известно, инверсорным называется устройство, осуществляющее преобразование $\rho_p \cdot \rho_q = K^2 = const$, где $\rho_p = \beta(\psi)$, $\rho_q = \rho(\varphi)$ (рис.1.11), а угол θ между

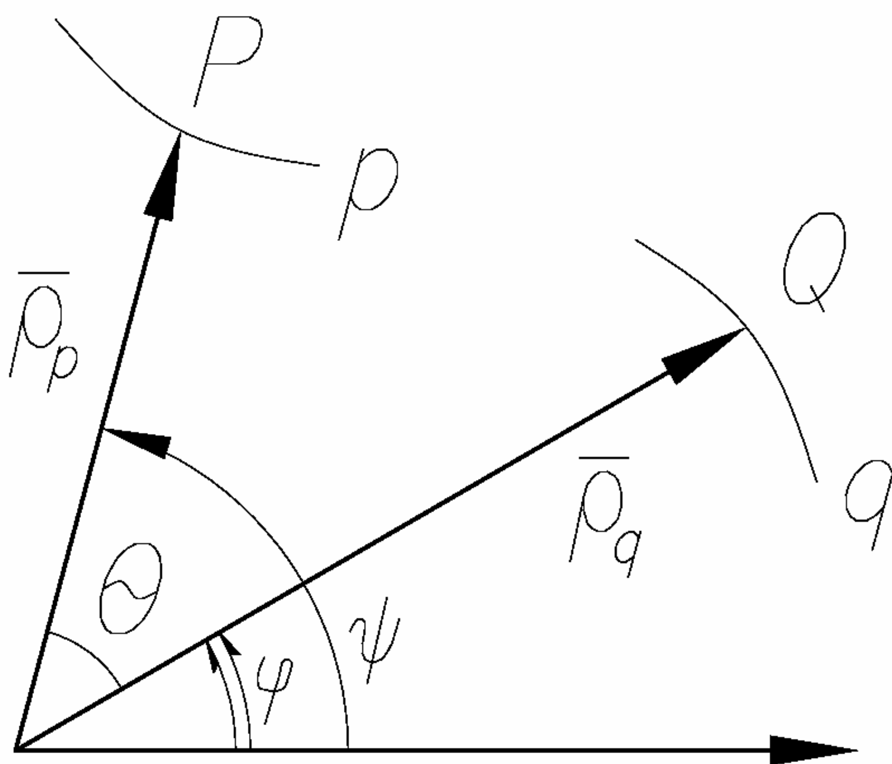


Рис. 1.11. Схема работы инверсорного устройства

векторами $\overline{\rho}_p$ и $\overline{\rho}_q$ постоянен [19]. Среди инверсионных механизмов, используемых в объективах, необходимо отметить конструкцию, предложенную Холстом [20] в 1934г. Схема объектива показана на рис.1.12.

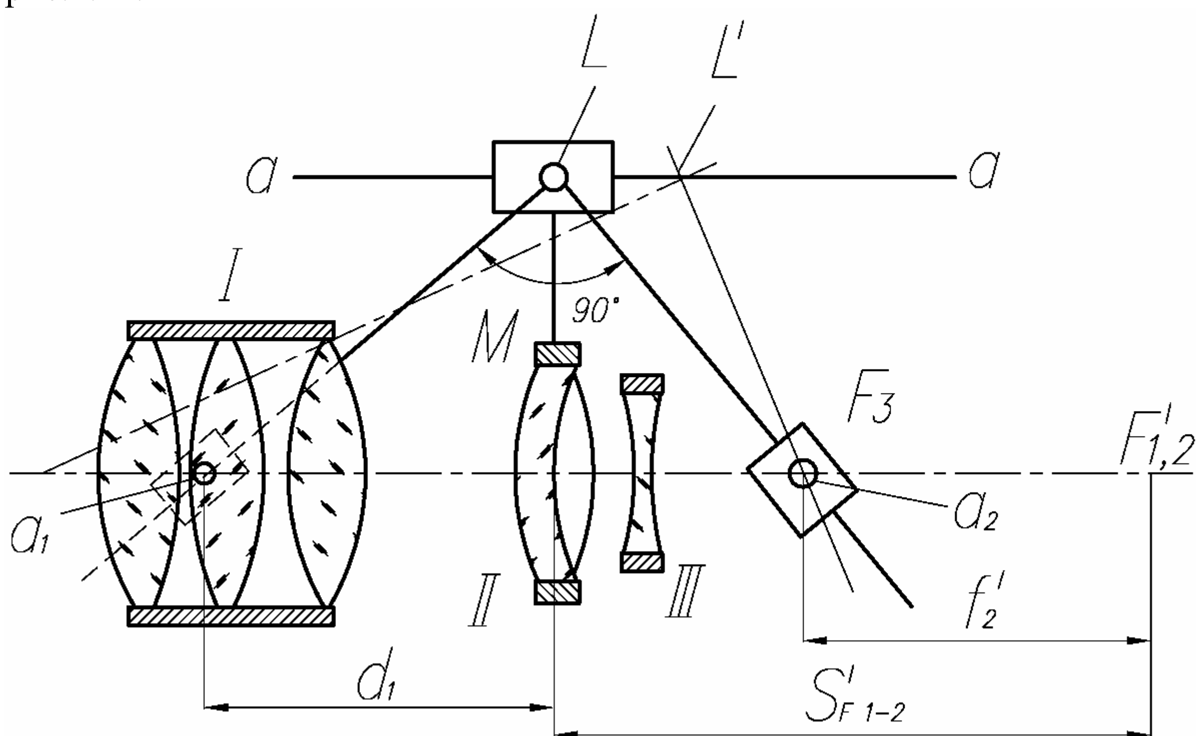


Рис. 1.12. Объектив с инверсорным механизмом

Первый компонент имеет возвратно-поступательное движение; второй перемещается по линейной зависимости; третий служит для коррекции остаточных аберраций. Фокусные расстояния первого и второго компонентов равны по абсолютной величине и обратны по знаку. Из схемы механизма непосредственно следует закон перемещения I и II компонентов: $(S'_{F1-2} - f'_1) \cdot d_1 = m_1^2$, где m_1 - расстояние от оси а-а до оптической оси. Перемещение компонентов происходит следующим образом. По оси а-а, параллельной оптической оси, вручную перемещается оправа *М* с компонентом *II*. При этом происходит вращение прямоугольного рычага вокруг оси, лежащей в передней главной плоскости второго компонента. Левый конец рычага скользит по втулке a_1, закрепленной на оправе первого компонента. Ось вращения втулки a_1 лежит в его главной плоскости. Правый конец прямоугольного рычага скользит в оправке a_2, ось вращения которой лежит в передней фокальной плоскости третьего компонента. При перемещении оправы *М* со вторым компонентом в сторону третьего компонента происходит совместное движение первого и второго компонентов, причем, второй компонент движется быстрее первого. Достигнув положения, при котором плечи прямоугольного рычага становятся равными, первый компонент останавливается, затем при дальнейшем движении оправы *М* со вторым компонентом вправо, она перемещается в противоположном направлении. В 1961г. в Японии был предложен объектив с двухкратным перепадом фокусного расстояния $f' = (50 \div 100)$ *мм*, в котором для перемещения оптических элементов был применен рычажный механизм [21], принципиальная схема которого показана на рис.1.13.

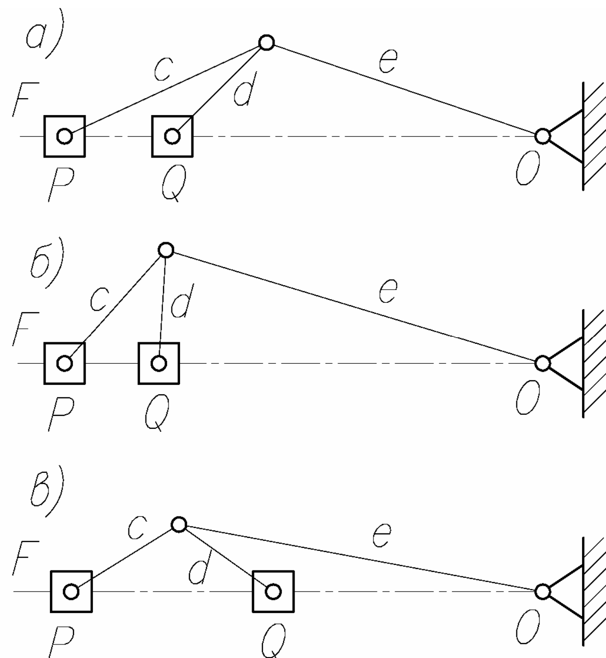


Рис. 1.13. Устройство рычажного механизма объектива

С ползунами P и Q рычажного механизма соответственно связаны второй и третий компоненты. В положении (рис.1.13,а) объектив имеет максимальное фокусное расстояние 100 мм, в положении (рис.1.13,б) – среднюю величину фокусного расстояния. При этом положении шатун d перпендикулярен к оси F, а увеличение третьего компонента, закрепленного на ползуне Q, равно – 1. В положении (рис.1.13,в) минимальная величина фокусного расстояния будет равна 50 мм. Несколько типов рычажных устройств для панкратических объективов предложил Манн (Германия, 1959г.) [22]. Два из них показаны на рис.1.14.

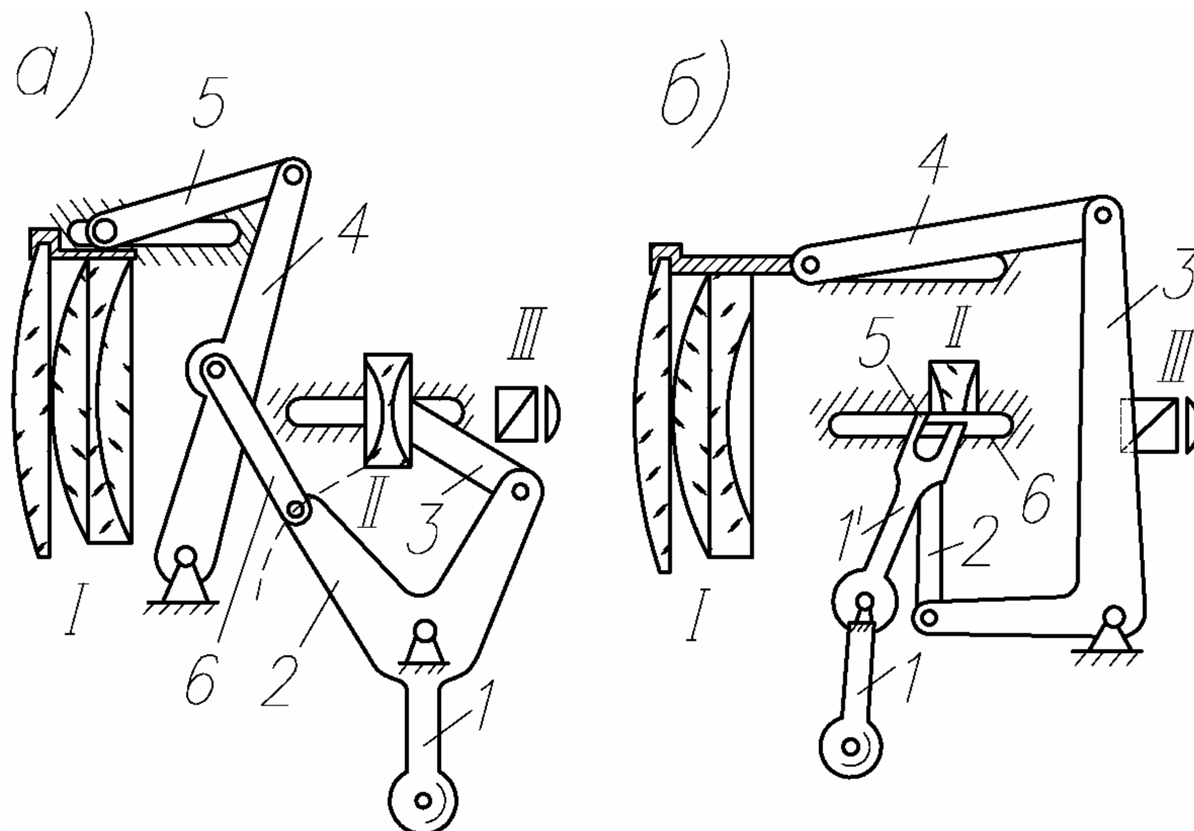


Рис. 1.14. Рычажные конструкции Манна

При изменении фокусного расстояния вращают рукоятку 1 по часовой стрелке, что вызывает перемещение второго компонента вправо вдоль паза. Если рычаги 6 и 2 до вращения лежали на одной линии, то рычаг 4 начнет вращаться также по часовой стрелке, перемещая рычаг 5 и компонент I вправо. При вращении рукоятки 1 против часовой стрелки компонент II будет двигаться влево, причем, перемещение первого компонента влево будет происходить до тех пор, пока рычаги 6 и 2 не окажутся на одной линии. Дальнейшее вращение рукоятки 1 против часовой стрелки вызовет поворот рычага 4 по часовой стрелке, а первый компонент будет перемещаться вправо. Положение рукоятки 1, при котором рычаги 2 и 6 лежат на одной линии, соответствуют увеличению второго компонента равного «-1». Этому же увеличению второго компонента отвечает положение рычагов (рис.1.14,б), при котором рычаг 2

перпендикулярен к прорези 6. При вращении рукоятки 1 по часовой стрелке движение через рычаг 1 и палец 5 передается рычагу 2 и второму компоненту, который перемещается вправо. При вращении в другую сторону рукоятки 1 первый и второй компоненты будут перемещаться влево, причем, движение первого компонента будет происходить до тех пор, пока рычаг 2 не станет перпендикулярен прорези 6. При дальнейшем движении рукоятки 1 компонент I начнет смещаться вправо.

1.3. Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с оптической компенсацией

В объективах с оптической компенсацией, как уже отмечалось, для изменения фокусного расстояния необходимо осуществлять перемещение подвижных компонентов между попеременно чередующимися с ними неподвижными компонентами. При разработке конструкций таких объективов приходится решать главным образом задачи, связанные с обеспечением рациональных с точки зрения точности и технологичности способов крепления и сопряжения подвижных и неподвижных компонентов; необходимого направления для подвижных компонентов при сохранении требуемой центрировки; удобного для оператора способа перемещения подвижных компонентов. В зависимости от того, как решается первая из этих задач, различают два типа конструкций. К первому типу относятся конструкции, в которых подвижные и неподвижные компоненты устанавливаются и крепятся один за другим в определенном порядке вдоль оптической оси. При этом крепление неподвижных компонентов между подвижными, а в некоторых случаях – подвижных между неподвижными, как правило, осуществляется винтами через отверстия и пазы в оправах (рис.1.15).

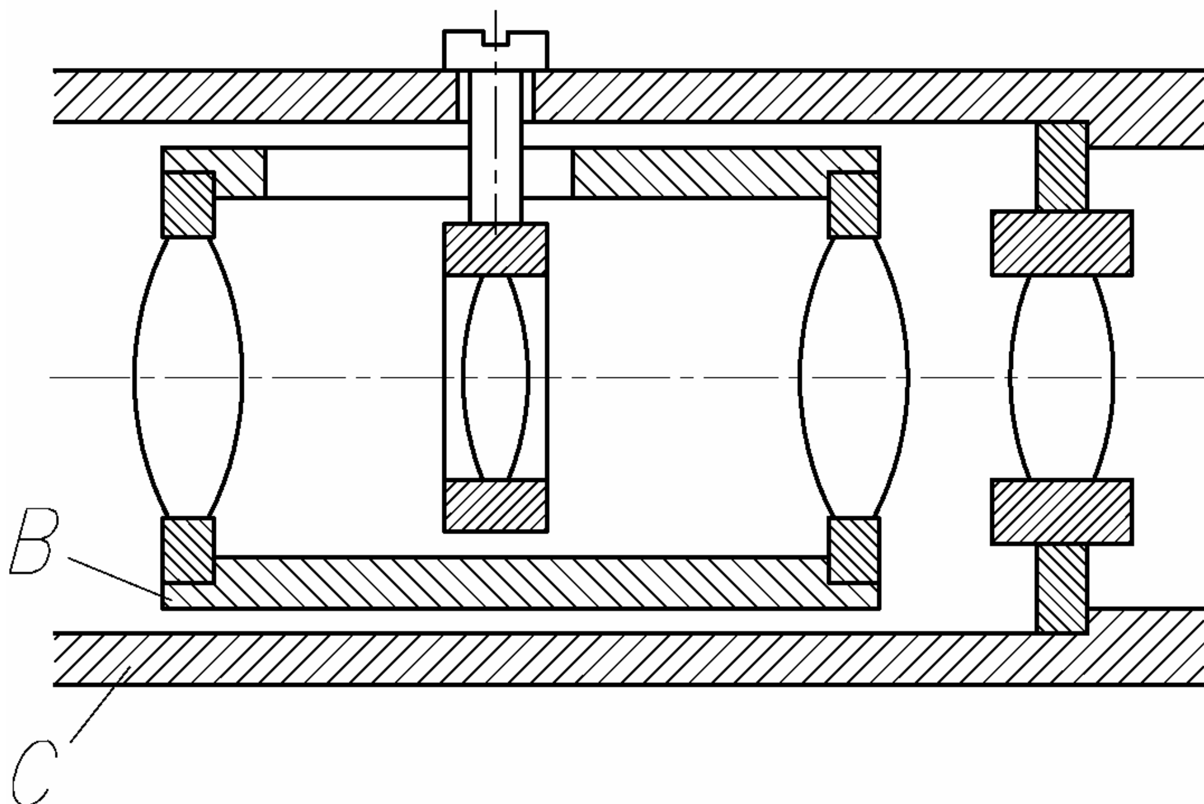


Рис. 1.15. Первый тип конструкции объектива

В таких конструкциях практически невозможно определить действительное взаимное расположение компонентов в собранном виде, т.к. непосредственный доступ к ним отсутствует. Ко второму типу

относятся конструкции, в которых сборка подвижных и неподвижных компонентов осуществляется двумя отдельными независимыми узлами (рис.1.22), устанавливаемыми относительно друг друга поперечными взаимными перемещениями. При такой сборке не нарушается предварительная поузловая выставка компонентов и отпадает контроль их взаимного расположения в готовом объективе. Направляющие моменты во всех известных конструкциях объективов с оптической компенсацией выполняются обычно в виде цилиндрических оправ аксиального типа.

Механизмы, предназначенные для перемещения подвижных компонентов, более разнообразны. Ими служат устройства с цилиндрическими кулачками, устройства с использованием резьбовых соединений и, наконец, устройства, в которых перемещение осуществляется вручную за выступающие части рычагов. Одной из первых систем с оптической компенсацией следует считать осветитель для микроскопа, разработанный Р. Рихтером в 1933г. [23]. На рис.1.16 показано его принципиальное устройство.

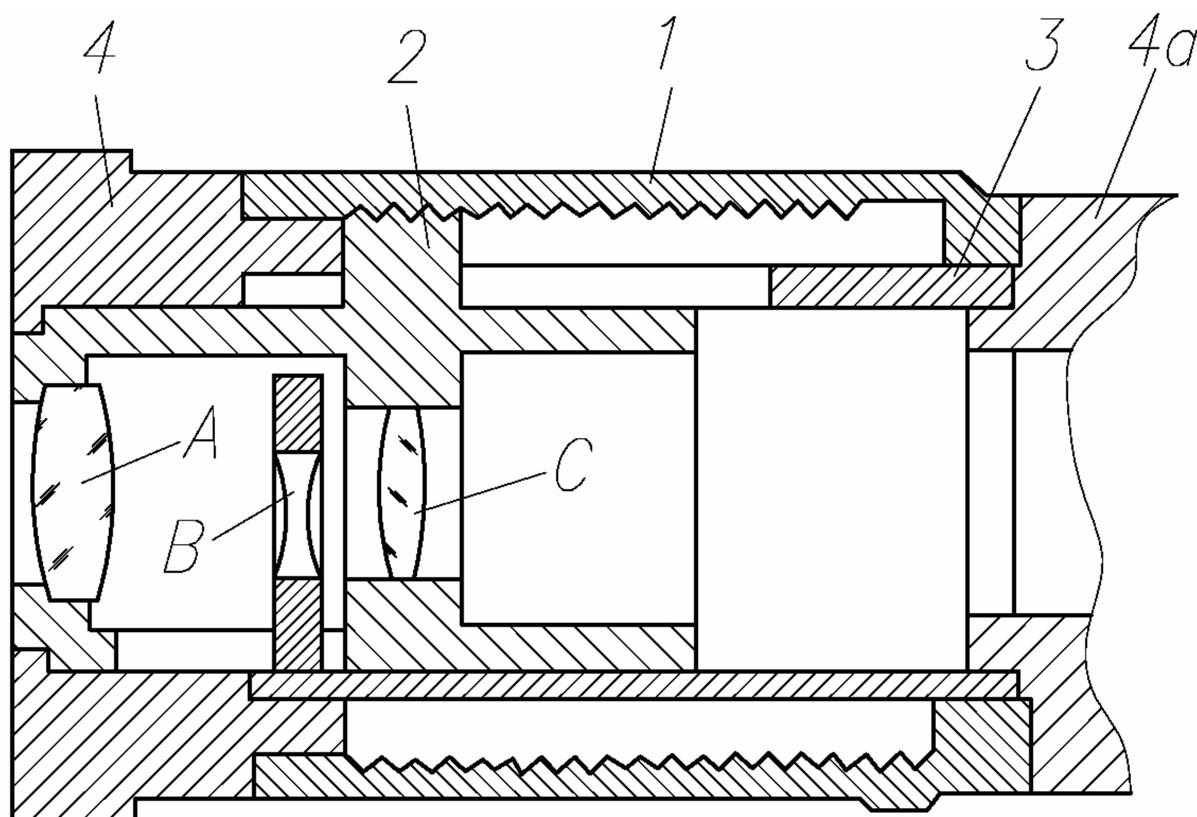


Рис. 1.16. Конструкция Рихтера

Для осуществления изменения увеличения в данной конструкции использован механизм с резьбовым соединением. Он работает следующим образом. Вращение оправы 1 с внутренней резьбой вызывает перемещение сопряженной с ней оправы 2, в которой закреплены подвижные компоненты *A* и *C*. Для исключения вращения оправы 2 служит прямой паз в детали 3. Направляющими элементами конструкции служат цилиндрические оправы аксиального типа. По способу сопряжения

подвижных и неподвижных компонентов конструкцию Рихтера следует отнести к первому типу. В 1950г. Сивильер [24] запатентовал конструкцию объектива «Пан-Синор», принципиальная схема которого дана на рис.1.17.

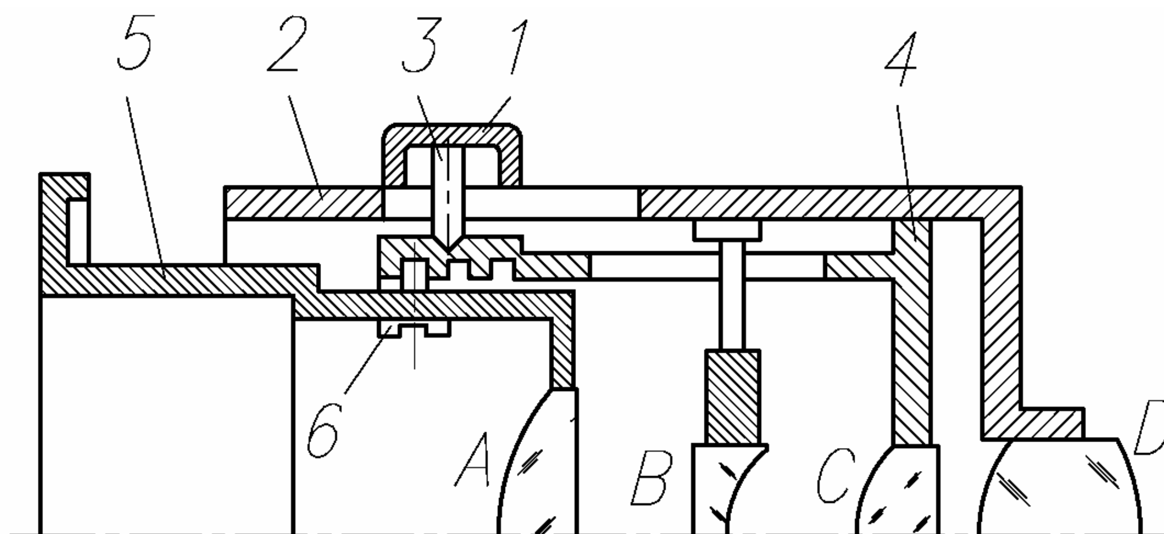


Рис. 1.17. Конструкция Сивильера

Изменение фокусного расстояния в данной конструкции осуществляется одновременным перемещением компонентов *A* и *C*. С этой целью используется кольцо 1, которое через палец 3, оправы 4, 5 и винт 6 связано как с компонентом *A*, так и с компонентом *C*. Смещение кольца 1 производится вручную вдоль прямого паза в корпусе 2. При фокусировке объектива вращается оправа 5 с установленным в ней винтом 6, который скользит в прямоугольном пазу оправы 4, вызывая продольно перемещение компонента *A*. В качестве направляющих элементов в данной конструкции используются гладкие цилиндрические оправы. По способу сопряжения подвижных (*A*, *C*) и неподвижных (*B*, *D*) компонентов конструкция Сивильера, как и предыдущая, относится к первому типу. В 1953г. Бэк и Лоуэн создают объектив (рис.1.18) [25], конструктивная схема которого подчинена задаче совмещения функций изменения фокусного расстояния и фокусировки в одном органе управления. Для этого служит стержень 1 с резьбой 2 на одном конце и рукояткой 3 – на другом. Изменение фокусного расстояния производится продольным перемещением стержня 1 в цилиндрической части 6 оправы 8. При этом связанные выступы 4 и 9 скользят в пазу 8а, перемещая оправу 9 с линзой *C* и оправу 5 с линзой *A* вдоль оптической оси. Фокусировка осуществляется вращением рукоятки 3. При этом выступ 4 оправы 5 перемещается вдоль прямоугольно паза 8а и паза в оправе 7, передвигая линзу *A*. Что касается направляющих элементов и способа сопряжения подвижных и неподвижных компонентов, то они аналогичны конструкции Сивильера.

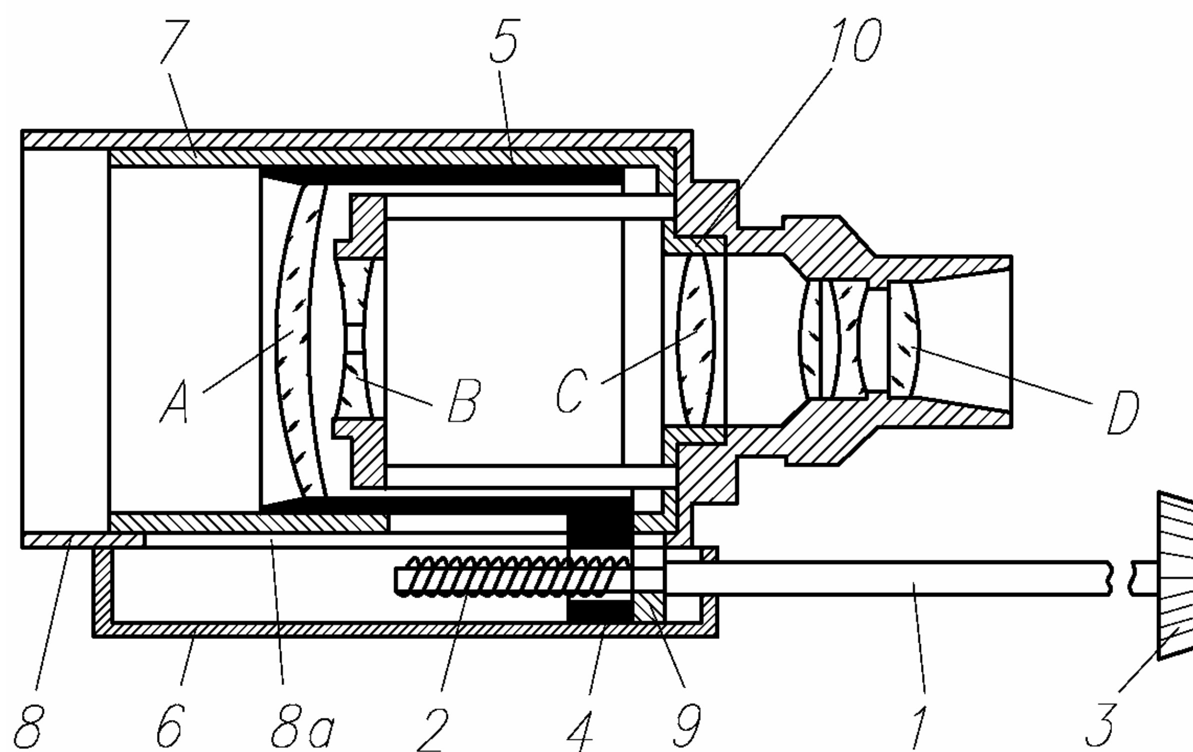


Рис. 1.18. Конструкция Бэка и Лоуэна

В 1960г. Бэк предложил две оригинальные конструкции объектива переменного фокусного расстояния [26]. В одной из них получает развитие идея совмещения узла фокусировки и узла изменения фокусного расстояния (рис.1.19), в другой (рис.1.20) эти узлы конструктивно разделяют. В конструкции, представленной на рис.1.19,

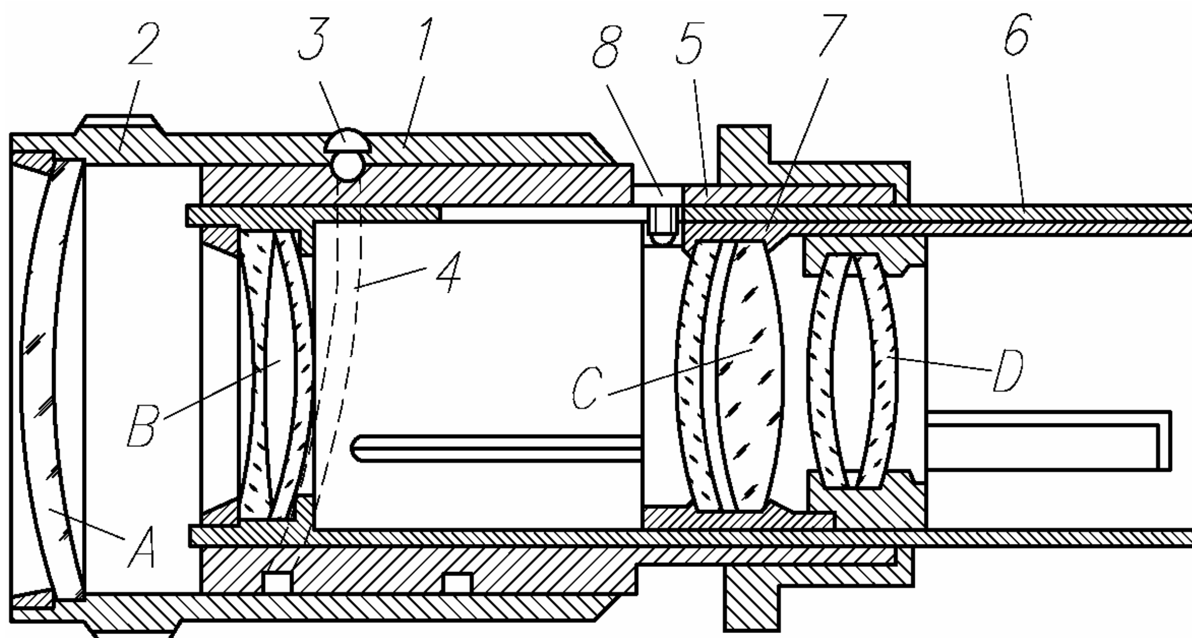


Рис. 1.19. Конструкция Бэка

изменение фокусного расстояния достигается продольным перемещением оправы 1 за накатанную часть оправы 2. Через винт 3, оправу 5, винт 8, ввинченный в прямоугольный паз в детали 6 в оправу 7, движение передается компонентам *A* и *C*. При фокусировке объектива вращают оправу 1 за накатку оправы 2, при этом винт 3 скользит в винтовом пазу 4, перемещая оправу 1 с первым компонентом *A* вдоль оптической оси. Такое совмещение фокусировки и изменения фокусного расстояния делает объектив более компактным, чем в первой конструкции Бэка [25]. Во второй конструкции изменение фокусного расстояния производится основным перемещением оправы 5 с компонентами *D* и *B*. Винт 6 служит для соединения компонента *B* с подвижной оправой 5. Отличие двух конструкций Бэка не только в решении узлов фокусировки, но и в подходе к решению панкратических частей объектива (компоненты *A*, *B*, *C* в первой конструкции и компоненты *B*, *C*, *D* – во второй). В конструкции, представленной на рис.1.19, один из подвижных компонентов крепится на винтах в тубусе с неподвижными компонентами. В конструкции на рис.1.20, наоборот, на винтах крепится неподвижный компонент в подвижном тубусе.

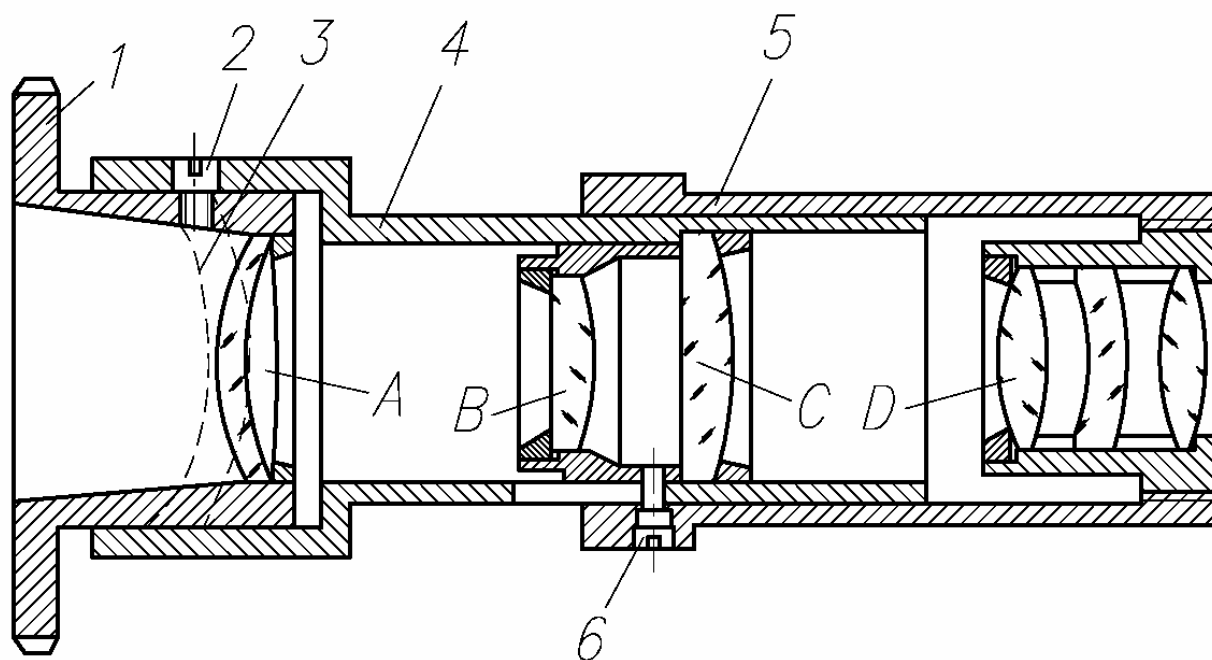


Рис. 1.20. Конструкция Бэка

Аналогично второй конструкции Бэка (рис.1.20) решена панкратическая часть (компоненты *B*, *C*, *D*) объектива «Зумар-16» [27] (рис.1.21).

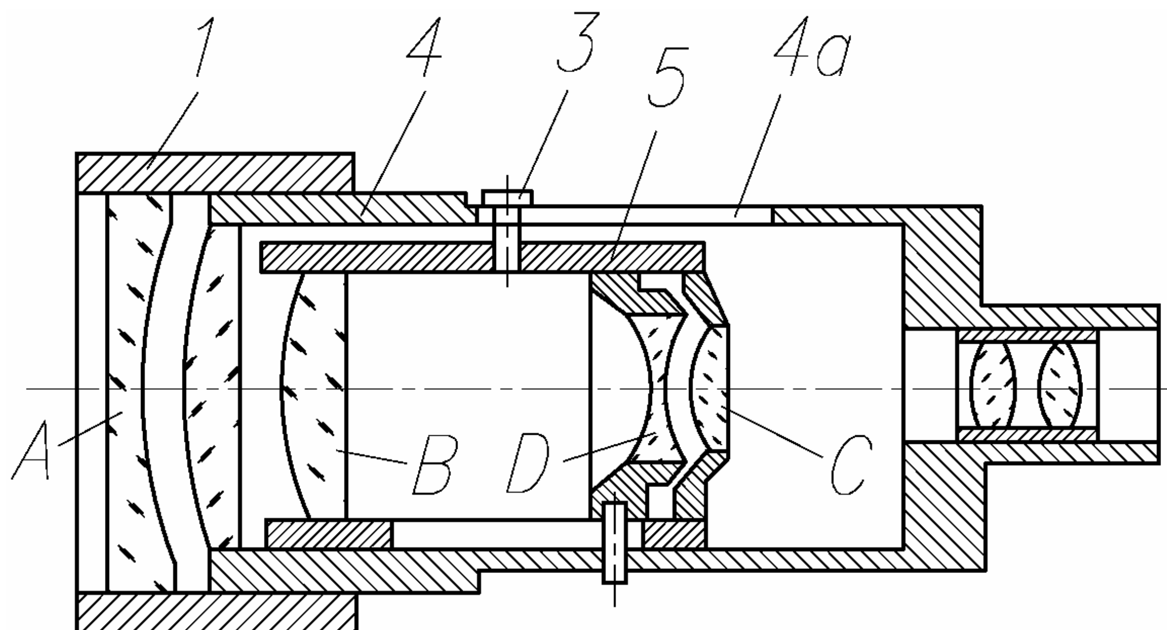


Рис. 1.21. Объектив «Зумар-16»

Изменение фокусного расстояния в объективе осуществляется смещением винта 3 в прямолинейной прорези 4а корпусной детали 4. При этом происходит перемещение подвижной оправы 5 с компонентами *B* и *C* вдоль оптической оси. Фокусировка также решена отдельно от узла фокусного расстояния. По такому же принципу построены панкратические части и узлы фокусировки отечественных объективов «Метеор-2» и «Метеор-5». В рассмотренных выше конструкциях (рис.1.17-1.21) способ сопряжения подвижных и неподвижных компонентов объективов сводится к последовательной установке и креплению компонентов вдоль оптической оси. Такое решение затрудняет обеспечение необходимой точности расположения компонентов, крепящихся посредством винтов через пазы и отверстия в оправах, и, как уже отмечалось выше, значительно усложняет контроль их взаимного расположения в сборке. Всего этого удалось избежать в конструкции, предложенной С.Г. Бабушкиным в 1962г. [28]. В ней (рис.1.22) наряду с возможностью контроля взаимного расположения компонентов обеспечивается их надежная ориентация в собранном объективе путем значительного увеличения длины направляющих элементов. Для достижения указанных преимуществ автор выполнил неподвижную 1 и подвижную 2 оправы в виде полуцилиндров. При сборке их совмещают таким образом, чтобы они образовывали цилиндр, и вставляют в общую базовую оправу 3. Перемещение подвижной оправы производят через прямолинейный паз 3а с помощью пальца 4. В конструкции объектива ПФ-2, показанной на рис.1.22, фокусировка объектива осуществляется перемещением компонента *A* с помощью резьбового соединения, причем повышение

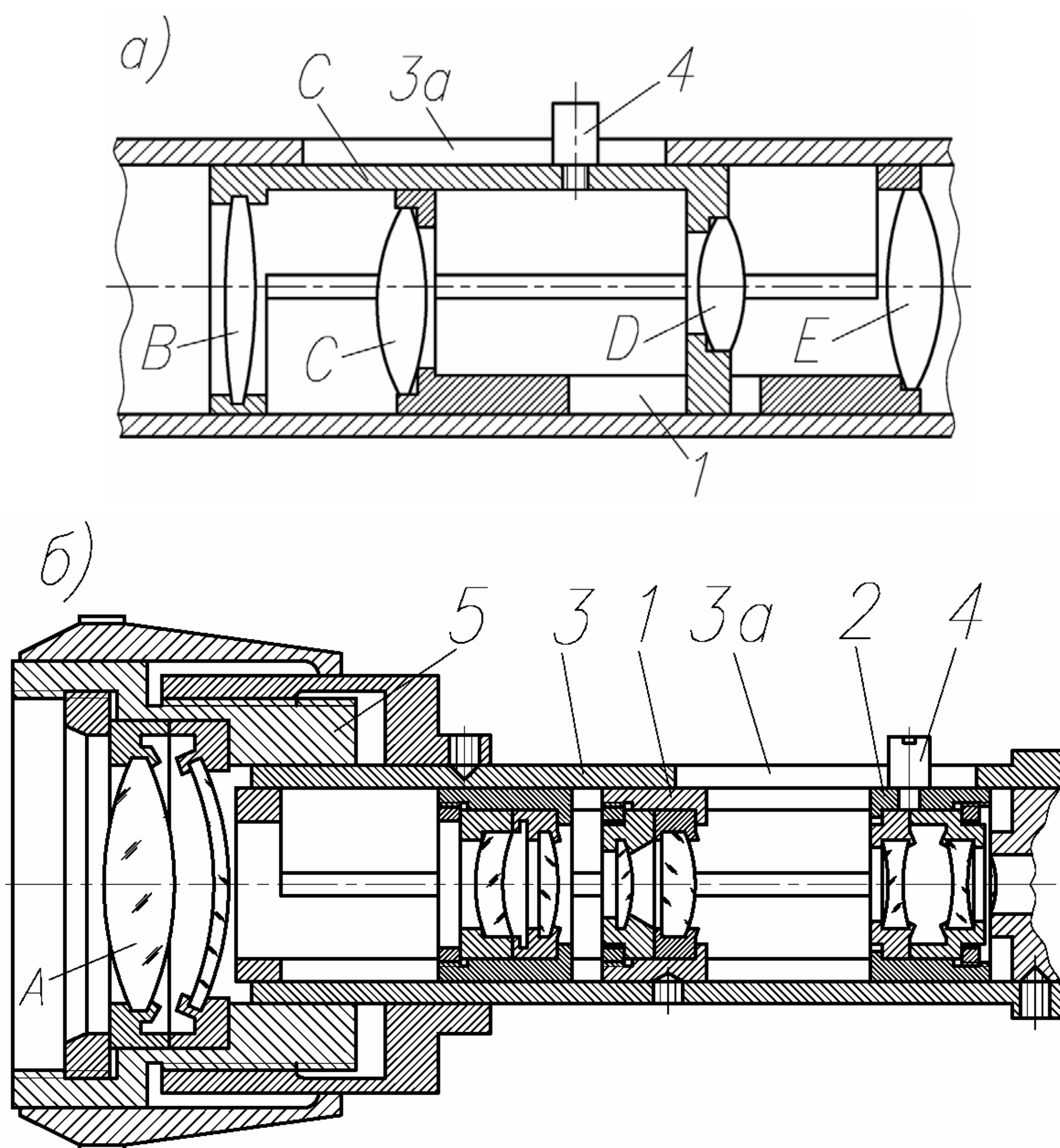


Рис. 1.22. Конструкция Бабушкина

точности центрировки компонента *А* при его перемещении вдоль оптической оси объектива обеспечивается сопряжением по цилиндрической посадке оправы 5 и корпуса 3. В заключение следует сказать следующее. Изготовление объективов переменного фокусного расстояния относительно трудоемко. Это обуславливает необходимость поиска новых путей их схемного, конструктивного и технологического совершенствования. Для конструкции объективов с оптической компенсацией более предпочтительны решения, когда подвижные и неподвижные компоненты собираются отдельными контролируемыми узлами. Относительная простота перемещения подвижных компонентов в объективах с оптической компенсацией обеспечивает возможность конструктивного объединения органов управления изменением фокусного расстояния и фокусировкой объектива.

2. Основные принципы конструирования объективов переменного фокусного расстояния

В настоящее время отсутствуют какие-либо единые методы проектирования, которые позволяли бы однозначно определять оптимальный вариант конструкции объектива переменного фокусного расстояния. Тем не менее накопившийся опыт проектирования на отечественных заводах, позволяет сформулировать некоторые принципы конструирования, как совокупность общих для проектирования правил.

2.1. Ознакомление с принципом построения и работы оптической схемы

Проектирование любых оптических систем, в том числе и объективов переменного фокусного расстояния, должно начинаться с изучения оптической схемы и таблиц коэффициентов влияния децентрировок качества изображения и продольных отклонений оптических элементов от расчетного положения на сдвиг плоскости изображения.

При наличии оптического выпуска со всем необходимым графическим и табличным материалом, конструктор в первую очередь должен выяснить следующее.

1. К какому классу объектив относится: к трансфокаторам или вариообъективам. Если к трансфокаторам, то каким образом рассчитывалась афокальная насадка и собственно объектив – раздельно или совместно.
2. Сколько оптических компонентов, склеек и линз содержит схема; каково число компонентов в насадке.
3. Из какого количества компонентов состоит панкратическая часть, каковы знаки и величины их оптических сил.
4. Каковы минимальные и максимальные величины переменных воздушных промежутков.
5. Как много подвижных и неподвижных компонентов в схеме.
6. Каковы величины допусков на положения подвижных и неподвижных компонентов объектива.
7. Какова величина заднего фокального отрезка и форма последней поверхности собственно объектива.
8. Каковы габариты отдельных линзовых элементов и всей оптической схемы в целом.
9. Какова толщина линз по краю.
10. Имеется ли перегиб на кривой, определяющий перемещение компенсирующего компонента и т.д.

Роль и значение коэффициентов влияния децентрировок продольных сдвигов оптических элементов на качество изображения в процессе проектирования, как уже отмечалось, чрезвычайно велико. Без знания

величин этих коэффициентов в различных точках диапазона изменение фокусного расстояния обоснованная и логически правильная работа по созданию конструкции практически невозможна. Положительный исход при такой работе может иметь место только в том случае, когда за плечами проектировщика богатый производственный опыт. Но в любом случае издержки при такой работе значительны.

В качестве примера практического использования коэффициентов влияния обратимся к таблицам 1, 2, рассчитанных для объектива «Вариогоир – ЛОМО».

Таблица 1. Коэффициенты влияния поперечных смещений $\Delta c_{\perp}$ на кому децентрировки в центре поля зрения $(\beta = 0°)$.

Номер компонента	$f' = f'_{\min}$	$f' = f'_{\max}$
I	0,024	-0,06
II	-0,05	0,10
III	0,027	0,01
IV	0,22	0,22
V	0,28	0,28

Таблица 2. Коэффициенты влияния осевых смещений ΔS компонентов на сдвиг плоскости изображения.

Номер компонента	$f' = f'_{\min}$	$f' = f'_{cp}$	$f' = f'_{\max}$
I	-0,006	0,03	-0,057
II	-0,07	0,17	0,02
III	0,60	0,30	0,05
IV	0,63	0,63	0,63
V	1	1	1

Анализ коэффициентов влияния поперечных смещений $\Delta c_{\perp}$ показывает, что из пяти компонентов, наиболее сильно влияющими на изменение поперечных аберраций, следует считать IV и V компоненты. Влияние смещений I-ого компонента – наиболее слабое.

Из табл.2 видно, что погрешности осевой выставки I-ого компонента сильнее всего сказываются на $f'_{\max}$, их влияние на этом фокусе, примерно, в сто раз выше, чем на $f'_{\min}$.

Это означает, что расчет точности устройства, которое должно перемещать первый компонент, и выставка дистанционной шкалы должна осуществляться на $f'_{\max}$.

Дальнейший анализ таблицы показывает, что при всех значениях фокусного расстояния точность продольно выставки второго компонента значительно ниже, чем у первого компонента. При этом погрешность выставки второго компонента наиболее сильно сказывается на средних

значениях фокусного расстояния, она в 2,5-8,5 раз выше, чем на крайних. Третий компонент должен выставляться при малых значениях f', так как требование к точности расположения на больших значениях фокусного расстояния в 12 раз ниже, чем на малых.

Полученные выводы позволяют обоснованно подойти к точностным требованиям на изготовление кулачков, используемых для перемещения подвижных компонентов.

IV и V компоненты наиболее сильно влияют на сдвиг плоскости изображения. Их можно использовать для юстировочных подвижек при компенсации сдвига плоскости изображения.

Таким образом, следует сказать, что анализ оптической схемы и таблиц с коэффициентами влияния позволяют конструктору обоснованно подойти к решению задач, связанных с проектированием объективов переменного фокусного расстояния и избежать в дальнейшем многих ошибок.

Более подробно об использовании коэффициентов влияния будет сказано ниже.

2.2. Изучение научно-технической и патентной литературы

Непосредственной работе над конструкцией объектива должны предшествовать сбор, обработка и изучение опыта выполнения отечественных и зарубежных образцов, анализ их достоинств и недостатков, выяснение тенденций развития в мировой практике.

Необходимо систематическое изучение отечественной и зарубежной периодической литературы и патентных материалов. К сожалению, необходимо отметить, что в настоящее время на отечественных заводах отсутствуют систематические подборки материалов по конструкциям объективов переменного фокусного расстояния.

В качестве основы для проведения таких подборок предлагается использовать данные, приведенные в этой главе.

2.3. Методика компоновки и агрегатирования объективов

Перед тем как приступить к решению всех необходимых задач компоновки объективов переменного фокусного расстояния, важно выявить то главное, что определяет производственные затраты на объективы. Это сразу позволит установить правильное направление разработки компоновочной схемы конструкции.

2.3.1. Трудоемкость изготовления

Трудовые затраты зависят главным образом от количества оптических элементов, их геометрической сложности, требуемой точности

расположения линз и компонентов в объективе, способа изготовления деталей и узлов, их юстировки, квалификации рабочих.

Сказанное, конечно, не охватывает вопроса во всей его сложности, но тем не менее дает понять, что на улучшение конструкции объектива могут значительно влиять очень многие факторы.

На рис.2.1 показаны соотношения трудовых затрат по цехам, занятых в производстве объективов ПФ-2, ПФ-3, «Агат-6А» и «Метеор-5».

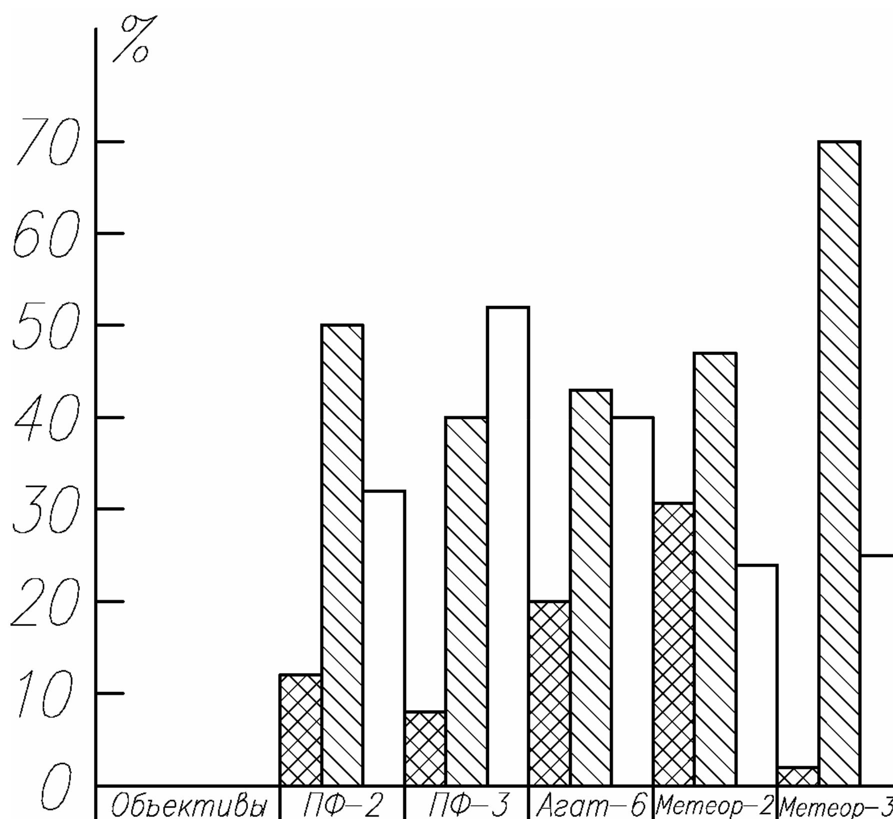


Рис. 2.1. Диаграмма трудовых затрат по цехам

На диаграмме двойной штриховкой обозначены затраты цехов по обработке механических деталей, одинарной – затраты оптических цехов, без штриховки – затраты сборочных цехов.

Трудовые затраты берутся в процентах от всех трудовых затрат на объектив.

Из диаграммы видно, что наибольшая доля трудоемкости изготовления – от 40 до 70 % приходится на изготовление оптических деталей и от 25 до 53% - на сборочные цеха; доля механических цехов составляет 1-17%. Большие затраты на механическую обработку в объективе «Метеор-2» – около 32% - объясняется тем, что большая часть механических деталей объектива не собственного производства, а покупные.

Полученные результаты показывают, что основная часть затрат при изготовлении объективов приходится на оптические и сборочные цеха. Поэтому снижение трудоемкости изготовления объективов, в первую очередь, связано с сокращением трудоемких работ в этих цехах.

Из диаграммы следует, что в объективах с оптической компенсацией (ПФ-2, «Метеор-2» и «Метеор-5») трудовые затраты на изготовление оптики значительно превосходят затраты на сборку по сравнению с соответствующими затратами на объективы с механическими компенсацией (ПФ-3, «Агат-6А»).

Объясняется это тем, что объективы с оптической компенсацией состоят из большего количества оптических элементов (более 18), в то время как в объективах с механической компенсацией их значительно меньше: в ПФ-3 – 15, а в «Агате-6А» – 13.

Из диаграммы видно, что если в объективах ПФ-2, ПФ-3, «Агат-6А» и «Метеор-3» трудовые затраты на изготовление оптики примерно одинаковые, то затраты на сборку этих объективов значительно отличаются друг от друга. Так, в объективах с оптической компенсацией (ПФ-2 и «Метеор-2») они соответственно составляют 35% и 25%, а в объективах с механической компенсацией (ПФ-3 и «Агат-6А») соответственно 53% и 38%.

Приведенные данные убедительно подтверждают тот факт, что объективы с механической компенсацией в сборке действительно представляют для производства более сложные системы, чем объективы с оптической компенсацией.

Таким образом, из рассмотрения затрат на изготовление объективов переменного фокусного расстояния следует, что вне зависимости от класса объектива и условий производства, качество изготовления в значительной степени формируется при сборке. Причем, чем ниже класс объектива, тем проще его конструкция и тем больше его сборка приближается к сборке, выполняемой на основе полной взаимозаменяемости, тем меньше ее влияние на качество объектива и тем относительно большее влияние на качество объектива оказывают свойства деталей и, следовательно, процессы их изготовления. Наоборот, чем сложнее объектив, тем в большей степени его качество формируется в процессе сборки. Так, в объективе ПФ-3 на сборку приходится 53% всех затрат на объектив, в то время, как на объектив ПФ-2, который имеет более низкие эксплутационно-технические параметры и более простую конструкцию, приходится 30%. На механическую обработку, наоборот, затраты в объективе ПФ-3, примерно, в два раза меньше, чем в объективе ПФ-2.

К основным причинам, определяющих большой объем трудовых затрат в сборочных цехах, следует отнести:

– нерациональность конструктивных решений объективов;
– низкий уровень унификации элементов конструкции;
– большой удельный вес юстировочных и доделочных работ, связанный с необходимостью достижения требуемой точности расположения оптических элементов в собранном объективе;
– отсутствие научно-обоснованных решений юстировочных задач, имеющих место при сборке объектива.

Из этого следует, что основное внимание при компоновке конструкции необходимо уделить решению вопросов сборки и юстировки объектива и проводить их следует так, чтобы наибольшее снижение трудоемкости приходилось на эти операции.

При компоновке должны быть учтены характер сборки и разборки, предусмотрены условия удобного осмотра и устранения отклонения компонентов от заданных положений в процессе юстировки без нарушения выставки других компонентов, разработаны принципиальные кинематические схемы механизмов и др.

Процесс компоновки во многом зависит от опыта, навыков и способностей конструктора, поэтому приводимая ниже методика не является единственно возможной, ее следует считать как пример, цель которого показать то основное, что в той или иной степени присуще проектированию того или иного объектива переменного фокусного расстояния.

2.3.2. Поузловая компоновка

Развитие систем переменного увеличения идет по пути усложнения конструктивных схем и повышения требований к точности их изготовления. При этом роль сборочно-юстировочных работ возрастает и вопросы блочности конструкции приобретает особенно важное значение.

Задача определения необходимой компоновочной схемы объектива должна ставиться на этапе составления ТЗ для оптического расчета. При этом конструктор должен учитывать тип возможного крепления объектива в съемочном аппарате и влияние его на сборку остальных узлов аппарата.

Исходя из этих рассуждений принципиальную компоновочную схему объектива можно представить в виде четырех блоков, как это показано на рис.2.2.

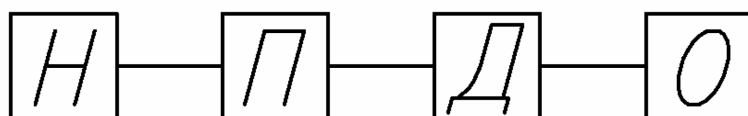


Рис. 2.2. Блочная схема объектива

При решении задач, имеющих место при проектировании конструкции объектива, необходимо всегда стремиться к соблюдению сборочной независимости указанных блоков. Это позволит отдельно собирать и контролировать их, облегчит поиск и устранение дефектов; значительно повысит уровень взаимозаменяемости отдельных элементов конструкции без разъюстировки соседних узлов; позволит организовать параллельные работы и этим сократить цикл сборки, даст возможность специализировать рабочие места и оборудовать их своими приспособлениями и т.д.

Исследование отечественных и зарубежных съемочных аппаратов показало, что количество практически применяемой компоновки блоков можно свести к четырем (см. рис.2.3), отличающихся друг от друга по месту расположения объектива О, призмы П и диафрагмы относительно насадки Н.

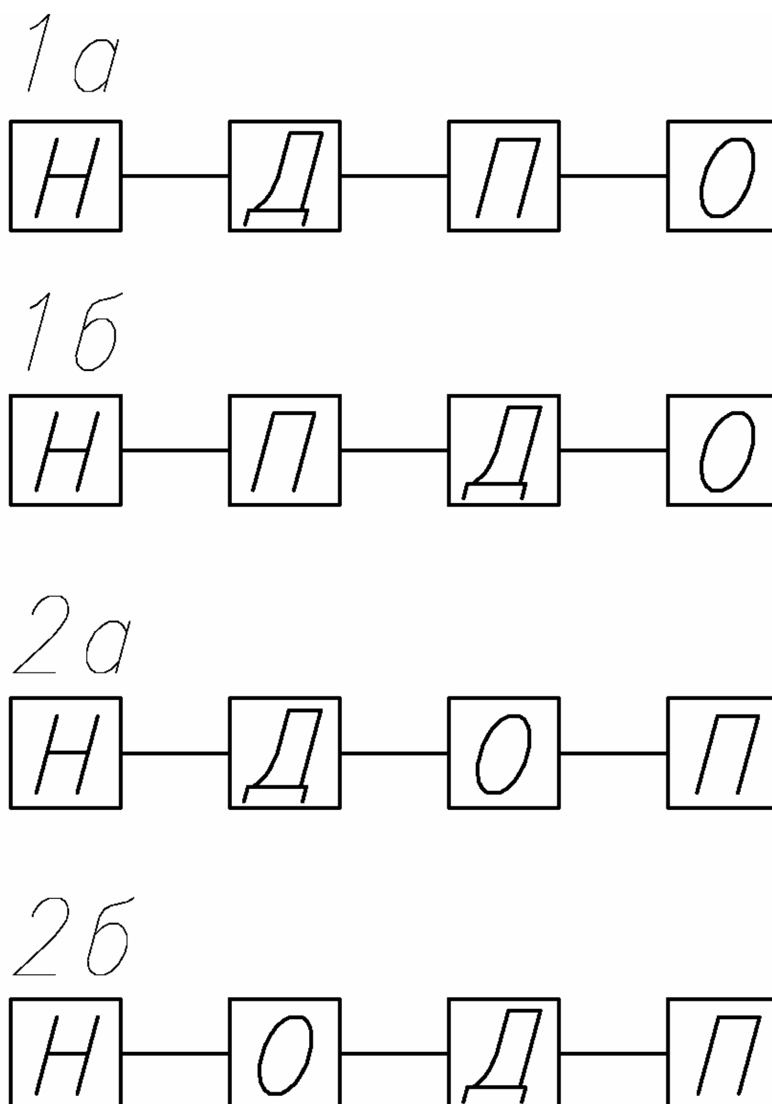


Рис. 2.3. Вариант компоновки

Принципиальное различие первого и второго вариантов состоит в том, что в первом случае блок призмы устанавливается до “собственно” объектива, а во втором – за ним.

Отличие вариантов 1а от 1б и 2а от 2б сводится к различному положению диафрагмы относительно призмы.

С точки зрения получения минимума габаритов объектива, второй вариант более предпочтителен чем первый, но если сравнивать варианты по величине трудовых затрат на сборку и юстировку, то второй вариант, безусловно, значительно уступает первому. При таком компоновочном решении повышаются требования к точности выставления призмы, так как она в этом варианте работает в сильно сходящихся пучках, и погрешности ее положения (заклоны) сильнее влияют на качество изображения, чем в параллельных или слабо расходящихся пучках, что имеет место в первом варианте. Кроме того, при выставлении плоскости изображения относительно полозков фильмового канала уменьшаются возможности юстировочных подвижек собственно объектива. В случае, когда призма П и объектив 0 объединены в единый узел, перемещение этого узла при совмещении плоскости изображения с плоскостью фильмового канала вызовет смещение изображения вдоль и поперек оси визира. Для избежания срезания поля зрения визира его выставление должно производиться после окончательной установки объектива относительно фильмового канала. Таким образом, установка визира в кинокамере становится зависимой. Это может усложнить производственный процесс сборки аппарата и, особенно, при повторных сборках-разборках, имеющих место в рабочих цехах.

Окончательный выбор того или иного варианта расположения призмы зависит от конкретных задач, стоящих перед проектировщиком.

Что касается положения диафрагмы, то в любительских объективах ее выставление до призмы при малых отверстиях диафрагмы приводит к изменению освещенности в визире; уменьшению точности внутрибазового дальномера; возникновению неравномерного экспонирования по полю кадра при использовании полупрозначных или зеркальных пятен и колец для отвода части светового потока в визир.

Все эти недостатки отсутствуют при установке диафрагмы после призмы.

Относительное крепление блоков насадки Н, призмы П и объектива О может быть следующим.

Насадка Н и призма П объединяются в один укрупненный узел “собственно” объектива О (рис.2.4).

Призма П и объектив О объединяются в один узел, к которому в дальнейшем присоединяют узел насадки Н (рис.2.5).

Соединение узлов может происходить или в единой корпусной детали (рис.2.4б и 2.5б) или по схемам, представленным на рис.2.4в,г и 2.5в,г. Здесь узел “собственно” объектива О или укрупненный узел “собственно”

объектива О и призмы П крепятся к корпусной детали насадки или корпусу киноаппарата одним из известных способов.

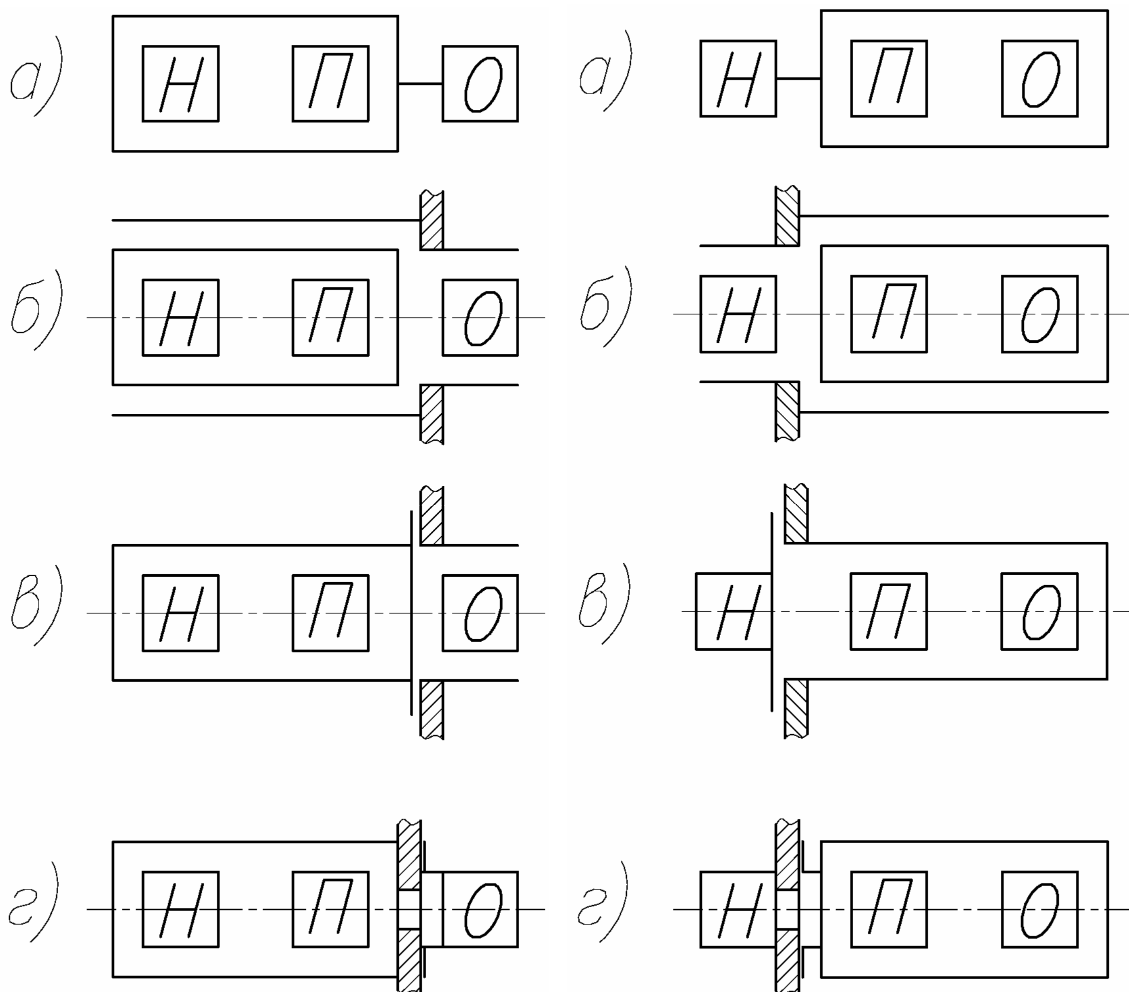


Рис. 2.4. Варианты крепления блоков объектива

Рис. 2.5. Варианты крепления блоков объектива

Объединение всех трех узлов в единой корпусной детали предпочтительнее использовать для вариообъективов, когда между насадкой и объективом имеет место значительная расходимость пучков лучей, при которой поперечные смещения и заклоны сильно сказываются на качестве изображения.

Второй вариант предпочтительнее для трансфокаторов или вариообъективов с незначительной расходимостью лучей за насадкой.

С точки зрения простоты и удобства сборки первый вариант значительно уступает второму.

В качестве примера рассмотрим принципиальные схемы конструкций объективов «Гранит-3» (рис.2.6).

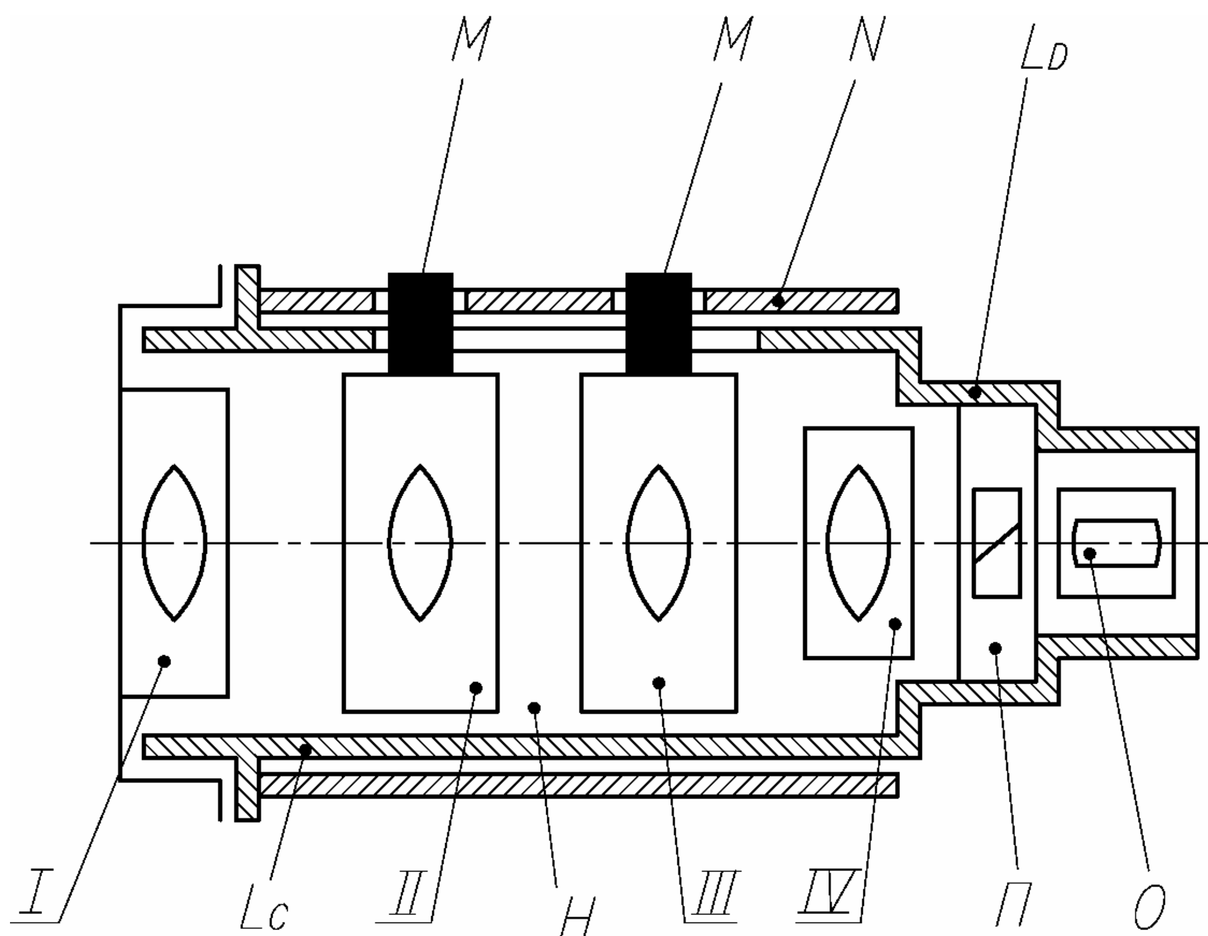


Рис. 2.6. Принципиальная компоновочная схема объектива «Гранит-3»

Узлы объектива «Гранит-3» крепятся в корпусной детали L, причем, если узел объектива О обладает автономностью, то этого нельзя сказать ни об узле призмы П, ни об узле насадки Н. Действительно, чтобы вынуть узел призмы П (для чистки или восстановления юстировки), необходимо последовательно разобрать всю насадку. То же самое приходится делать, если по каким-либо причинам требуется доступ к IV компоненту. Понятно, что такой разборки насадки можно и не производить, если выполнить ее отдельным узлом; в этом случае достаточно было бы провести расстыковку ее корпусной части L_C с остальной частью L_D. При этом, без разборки всей насадки, открывался бы доступ к узлу призмы и компоненту IV.

На рис.2.7 изображена схема другого объектива «Метеор-2». В этой конструкции, как и в предыдущей, только объектив VII является независимым узлом. Узлы призмы и насадки не обладают этим свойством. Но в отличии от объектива «Гранит-3» здесь более удачно решена компоновка насадки. Она состоит из трех независимых узлов: узла I компонента, узла А подвижных компонентов II и IV и узла Б неподвижных компонентов II и V, которые быстро и просто собираются и разбираются в корпусе объектива. Конструкция объектива еще более выиграла, если бы поузловое членение объектива было выполнено до конца. Так, при

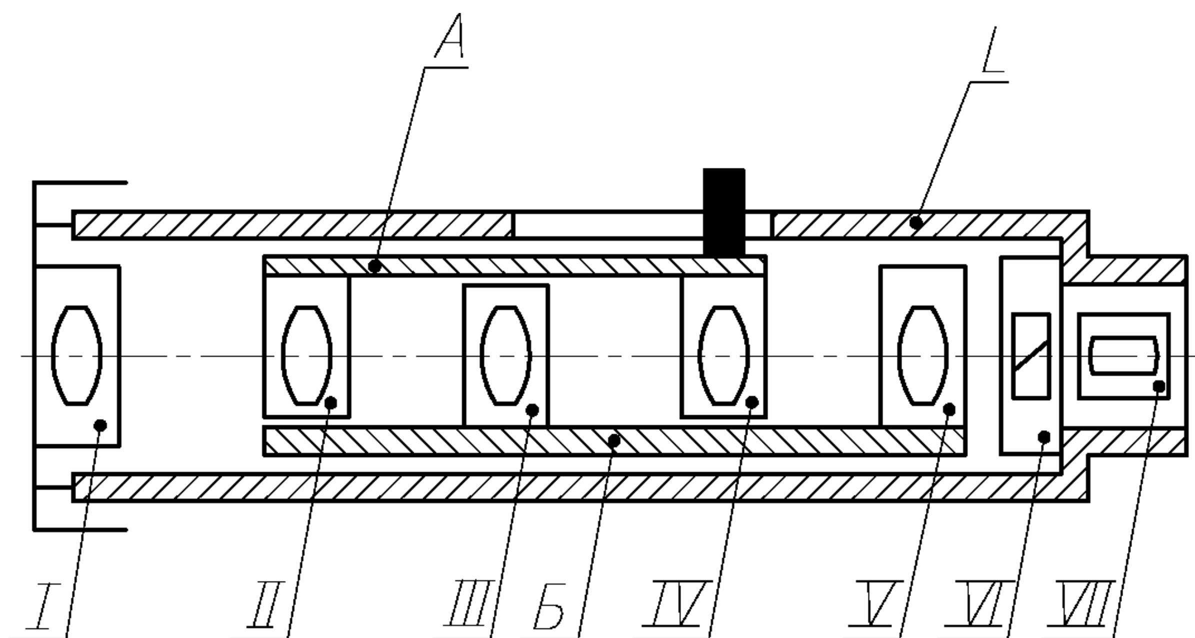


Рис. 2.7. Принципиальная компоновочная схема «Метеор-2»

изготовлении насадки отдельным блоком, значительно облегчились бы установка призмы, IV компонента и доступ к ним. Указанных недостатков лишена компоновочная схема объектива «Агат-14» (рис.1.7).

В этой конструкции "собственно" объектив и призма объединены в один узел, который собирается и юстируется отдельно от узла насадки. Из схемы следует, что для того чтобы вынуть узел призмы не надо разбирать всю насадку, как это приходилось делать в объективе «Гранит-3». Для этого достаточно снять укрупненный узел призмы П и собственно объектива О.

При такой компоновке без особого ущерба для юстировки всего кинообъектива, возможен легкий доступ к призме, собственно объективу и насадке.

2.4. Проектирование насадки

2.4.1. Основные задачи, решаемые при проектировании насадки

Насадка, как отмечалось выше, выполняет основные функции в объективах переменного фокусного расстояния: при перемещении ее компонентов происходит изменение фокусного расстояния объектива и компенсация возникающего при этом сдвига плоскости изображения.

Трудности проектирования насадки сводятся в основном к решению задач выбора необходимых механизмов для придания плавного перемещения подвижным компонентам насадки в соответствии с заданными законами движения; сохранения допустимой центрировки во всем диапазоне перемещения этих компонентов; обеспечение простоты и удобства сборки и юстировки насадки. Невыполнение хотя бы одного из поставленных требований значительно снижает возможность серийного выпуска изделия.

Удовлетворительное решение задач зависит от многих факторов и, в первую очередь, от ожидаемого объема выпуска объективов, кинематического построения оптической схемы, допустимых отклонений оптических элементов от расчетного положения и допустимых габаритов.

2.4.2. Проектирование подвижных компонентов

После тщательного ознакомления с таблицами коэффициентов влияния конструктор должен обратить внимание на подвижные элементы. Именно с них необходимо начинать проектирование насадки, так как от того насколько тщательно они спроектированы будут зависеть основные функциональные и эксплутационные свойства объектива.

Наиболее важным, как с точки зрения нахождения принципиальной схемы механизма перемещения компонентов, так и ожидаемой последовательности сборки насадки является вариатор. Перемещаясь на значительно большие расстояния, чем компенсатор, он накладывает серьезные ограничения на выбор максимальной длины направляющей, чем фактически определяет возможность появления или отсутствия заедания. Например, в объективе ПФ-3 при перемещении вариатора на 41,6 мм длина направляющей не может быть больше 8 мм.

При цилиндрических направляющих аксиального типа, примененных в этом объективе, и тех материалах, из которых они изготовлены (Д16Т – ЛС59-1), для предотвращения неизбежного при этом заклинивания перемещение компонента осуществляется тремя пазами, расположенными друг относительно друга через 120°.

В объективе «Агат-14», в котором также использованы цилиндрические направляющие аксиального типа, длину направляющей больше чем 12 мм получить не удалось. При применении одного направляющего паза вместо

трех, заедание удалось устранить уменьшением трения в трущейся паре за счет отказа от пары Д 16Т – Д 16Т и переходом к паре В95 – фторопласт-4.

В объективе «Вариогор-2Б» использование конструкции направляющих аксиального типа с длиной направляющей 30 мм даже с анодированными трущимися парами В95 – В95 не удалось получить необходимой плавности хода. В результате чего пришлось перейти к другому типу направляющих цилиндрическим аксиальным (конструкция на пинолях), что позволило значительно улучшить плавность хода.

Таким образом, решение конструкции вариатора определяет фактически выбор типа направляющих для перемещения подвижных компонентов в объективе.

Конструкция вариатора должна решать и другую важную задачу: возможность юстировки контрольных переменных воздушных промежутков объектива. Это означает, что с помощью вариатора должно осуществляться приведение переменных воздушных промежутков в соответствии положению винтов в направляющих пазах относительно конструктивной базы кулачка. Теоретические основы юстировки промежутков будут рассмотрены нами в главе 3.

2.4.3. Выбор механизма для перемещения компонентов

Число возможных механизмов, которые могли бы быть использованы для перемещения подвижных компонентов по заданным законам, достаточно велико. Но в практике проектирования отечественной и зарубежной промышленности наибольшее распространение получили два типа механизмов: кулачковые устройства с применением цилиндрических и дисковых кулачков и рычажные устройства (см. п.1.2).

Выбор того или иного механизма зависит от многих факторов:

- выходных параметров объектива,
- ожидаемого объема выпуска,
- производственных мощностей на данном предприятии,
- культуры производства, сложившихся традиций и т.д.

Из этого следует, что давать какие-то окончательные рекомендации по выбору механизмов чрезвычайно сложно и трудно.

Но изучение патентной и технической литературы, исследование зарубежных образцов позволяют сделать следующие выводы:

1. Для получения минимальных габаритов объективов и особенно объективов с большим перепадом изменения фокусного расстояния почти всегда применяются цилиндрические кулачки аксиального типа.
2. Если требования к габаритам не являются преобладающими и объективы относятся к массовым или крупным партиям, то применение дисковых кулачков более предпочтительно.

3. Применение рычажных механизмов весьма редкое явление и используются они в основном при перепадах фокусных расстояний, не превышающих $2\text{-}3^X$.

2.4.4. Задачи, решаемые при проектировании механизма перемещения компонентов

При проектировании механизма для перемещения подвижных компонентов конструктор должен, во-первых, стремиться к получению минимально простого, с технологической точки зрения, решения, так как нельзя забывать, что речь идет об объективах, выпускаемых крупными сериями.

Во-вторых, конструктор должен обеспечить требуемую точность децентрировки подвижных компонентов на всем диапазоне изменения фокусного расстояния.

В-третьих, конструктор должен добиться такой плавности хода, когда перепад усилий при изменении фокусного расстояния не превышал бы 1,5-2 раз, а момент вращения кулачка не превышал бы заданной величины, определяемой характеристиками электродвигателей, используемых для зуммирования.

В-четвертых, при использовании цилиндрических кулачков необходимо стремиться к тому, чтобы число пазов в нем не превышало бы двух (один – криволинейный, для компенсатора, второй – винтовой, для вариатора), так как нарезание большого количества пазов, например, шести в объективах «Гранит-3» и «Пандора-6А», ведет к снижению точности расположения компонентов, увеличению перепадов в моментах вращения при переходе точки перегиба криволинейного паза, уменьшению угловой длины паза, что ведет к ослаблению жесткости кулачка и повышению трудовых затрат на его изготовление.

В-пятых, при проектировании оправ подвижных компонентов объективов среднего и высокого класса желательно учесть возможность раздельного контроля их центрировки.

В-шестых, в конструкции должна быть учтена возможность корректировки контрольных переменных воздушных промежутков с помощью резьбового соединения, прокладок, эксцентричных винтов, шайб или «сухариков», ограничивающих вращение кулачка.

В-седьмых, желательно устанавливать и крепить отдельные линзы в оправах в подвижных компонентах со стороны входа и выхода насадки. Это позволит при сборочно-разборочных работах значительно упростить работы, связанные с проведением центрировки, чистки объективов и различного рода доделочных операций.

2.4.5. Анализ конструкций направляющих для подвижных компонентов

В большей части объективов переменного фокусного расстояния применяются направляющие замкнутого типа с трением скольжения по цилиндрическим и призматическим поверхностям.

Выше отмечалось, что основной проблемой, решаемой в процессе проектирования, является проблема обеспечения высокой точности положения подвижных компонентов. Проанализируем подробнее с этой точки зрения конструктивные решения направляющих, нашедших в настоящее время наиболее широкое распространение в объективах переменного фокусного расстояния.

Цилиндрические направляющие аксиального типа

Поперечные смещения подвижных компонентов в конструкции с направляющими аксиального типа определяются заклоном в зазоре Z между корпусом и наружной оправой компонента и поперечным смещением в зазорах Z_1, Z_2, Z_3 между винтами и соответствующими пазами кулачка (рис.2.8). Заклон в зазоре Z возникает из-за самоторможения оправы компонента в корпусе объектива, что часто происходит из-за неправильного выбора длины направляющих для применяемых видов материалов.

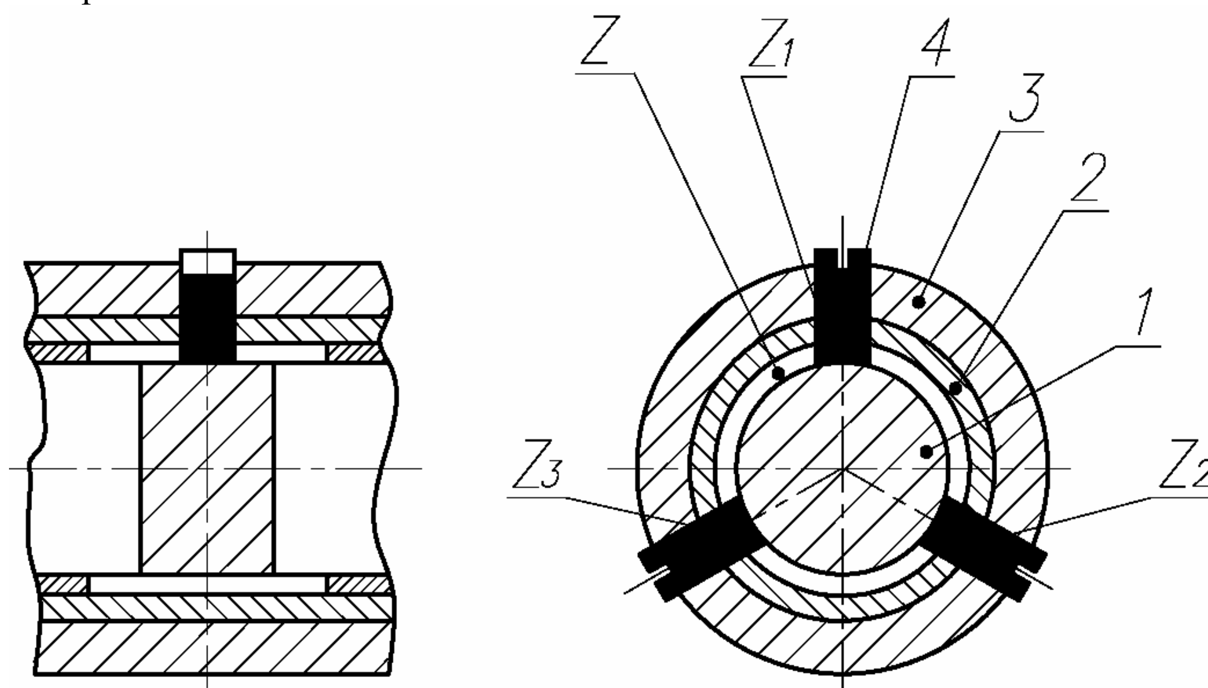


Рис. 2.8. Конструкция с направляющими аксиального типа

При малом зазоре между подвижными компонентами и корпусом объектива возникающее реактивное давление *R*, прикладываемое к оправе подвижного компонента, распределяется по закону, зависящему от многих параметров. Будем предполагать, что

$$F = \frac{3Pd}{l} N \qquad [29]$$

Самоторможение отсутствует при $P \geq F = F_1 + F_2$, где P – действующая сила. Откуда $l \geq 3\mu d$ (рис.2.9).

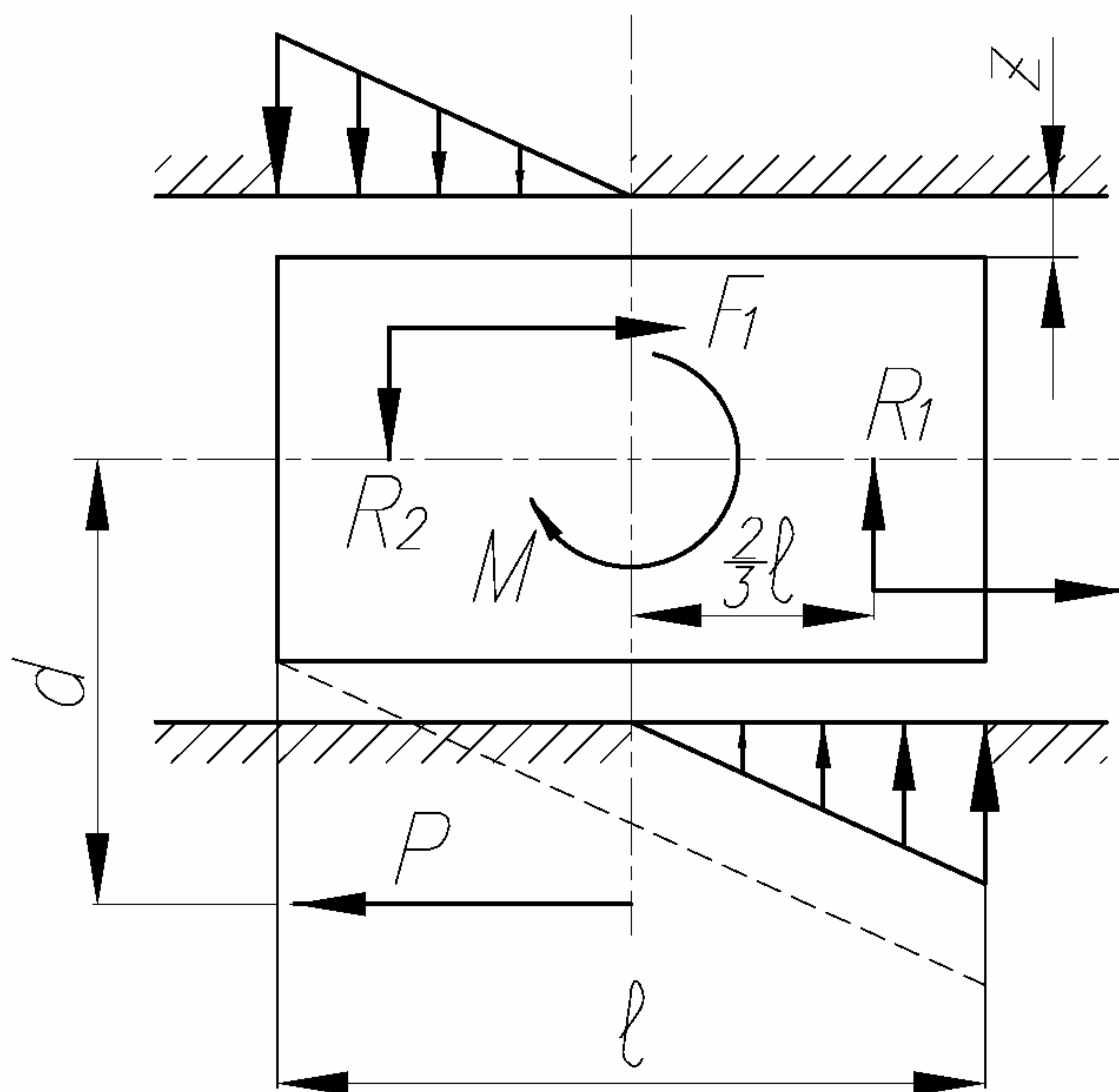


Рис. 2.9. Схема распределения усилий в подвижном компоненте

Для обеспечения большой легкости хода и уменьшения износа рекомендуется выбирать длину направляющей так, чтобы $l \geq 4\mu d$.

В случае применения анодированных пар Д16 – Д16, для которых коэффициент сухого трения равен $\mu = 0{,}35$, длина l направляющей

подвижных компонентов должна быть не менее $l = 1{,}4d$ мм, а при использовании смазки $l = 0{,}4d$ мм.

Анализ направляющих в объективе «Агат-14» на основе полученных соотношений показал, что в этом объективе длина направляющих равна 22 мм и без использования смазочных материалов возможно заклинивание ($l = 30{,}8$ *мм при* $\mu \approx 0{,}35$; $l = 8{,}8$ *мм при* $\mu \approx 0{,}1$).

Оценим поперечное смещение компонента в зазоре между винтами и пазами корпуса, расположенными через 120° (рис. 2.10).

Пусть имеется подвижный компонент, оптическая ось которого проходит через точку 0 перпендикулярно к координатной плоскости XOY. Пусть между винтами и корпусом в пазах имеются зазоры Z_1, Z_2, Z_3, в общем случае не равные между собой.

Допустим, что компонент смещается в направлении, определяемом углом θ (рис.2.10).

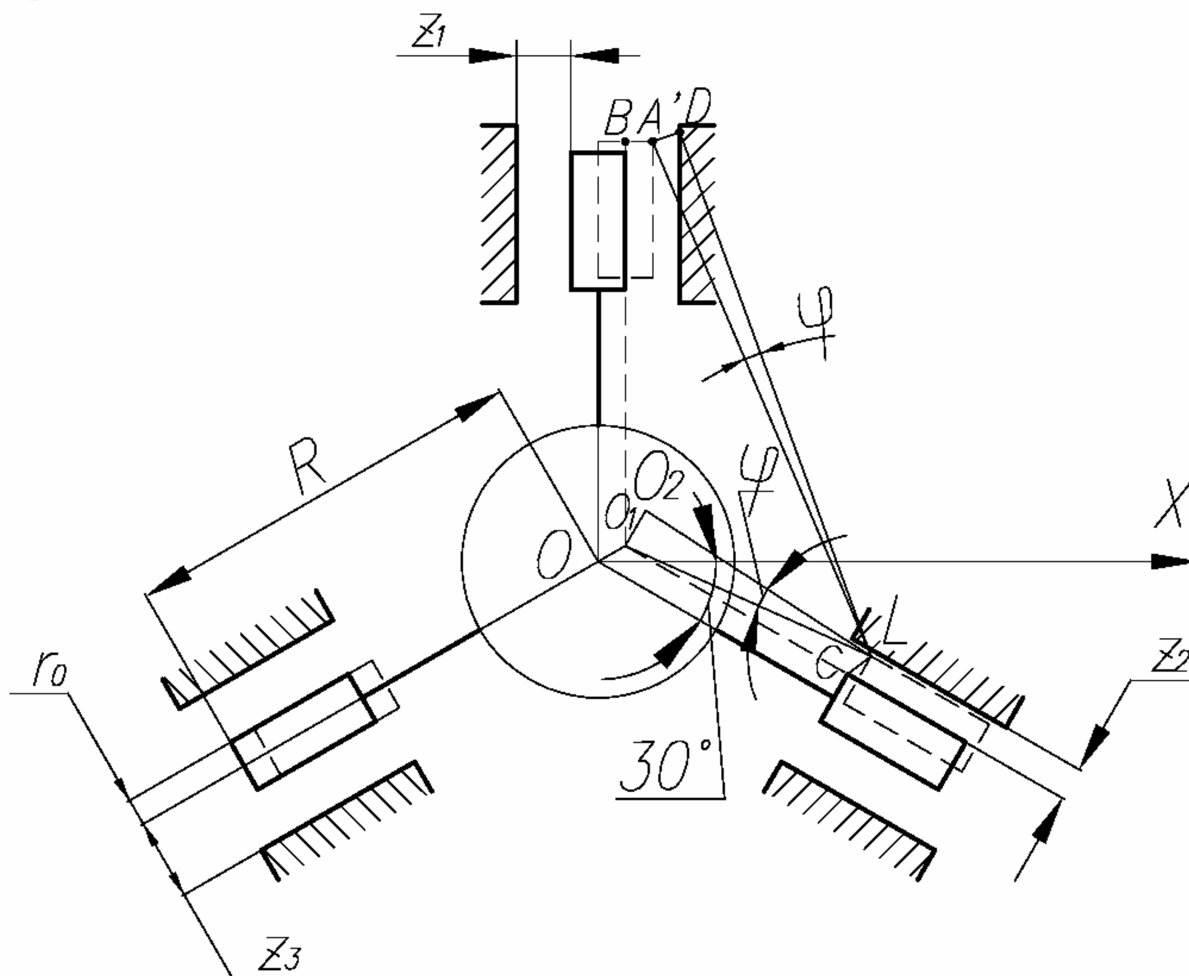


Рис. 2.10. Схема смещений компонента в зазорах Z_1, Z_2 и Z_3

Величина этого смещения OO_1 определяется зазором Z_2 и будет равна

$$CL = \frac{Z_2}{\sin(\theta + 30°)} = OO_1 .$$

После того как точка C займет положение точки L, последует разворот компонента относительно точки L на угол φ за счет зазора

$$Z_1 - BA' = A'D = Z_1 - \frac{Z_2 \cos\theta}{\sin(\theta + 30°)}, \quad \varphi = \frac{A'D}{A'L} = \frac{Z_1 \sin(\theta + 30°) - Z_2 \cos\theta}{3R \sin(\theta + 30°)}.$$

При развороте компонента на угол φ, его центр, занимавший положение O_1, переместится в положение O_2. Величина этого смещения будет равна

$$O_1O_2 = O_1L \cdot \varphi = \frac{r_0}{\sin\alpha} \cdot \varphi.$$

Определим суммарную величину смещения OO_2. Для этого спроектируем OO_1 и O_1O_2 на оси координат X и Y

$$\sum X = OO_1 \cos\theta + O_1O_2 \cos(60° + \alpha),$$

$$\sum Y = OO_1 + \sin\theta + O_1O_2 \sin(60° + \alpha).$$

Так как α мало $\left(tg\alpha = \dfrac{r_0}{R}\right)$, то можно считать

$$\cos(60° + \alpha) = \cos 60°, \ \sin(60° + \alpha) = \sin 60°,$$

$$O_1O_2 = \frac{r_0}{\sin\alpha}\varphi = \frac{R\varphi}{\cos\alpha} = R\varphi.$$

Тогда

$$\sum X = \frac{Z_2 \cos\theta}{\sin(\theta + 30°)} + \frac{Z_1 \sin(\theta + 30°) - Z_2 \cos\theta}{3\sin(\theta + 30°)},$$

$$\sum Y = \frac{Z_2 \sin\theta}{\sin(\theta + 30°)} + \frac{3[Z_1 \sin(\theta + 30°) - Z_2 \cos\theta]}{\sqrt{3}\sin(\theta + 30°)}.$$

Отсюда

$$OO_2 = \sqrt{\left[\frac{2\cos\theta \cdot Z_2}{3\sin(\theta + 30°)} + \frac{1}{3}Z_1\right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}\sin\theta - \cos\theta}{\sqrt{3}\sin(\theta + 30°)}Z_2 + \frac{1}{\sqrt{3}}Z_1\right]^2}.$$

Поскольку, как правило, допустимые значения зазоров $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_0$, то величина смещения компонента равна:

$$OO_2 = \frac{\sqrt{28}}{3}Z_0 = 1{,}76 \cdot Z_0 \ \textit{при} \ \theta = 0°;$$

$$OO_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}Z_0 = 1{,}15 \cdot Z_0 \ \textit{при} \ \theta = 30°;$$

$$OO_2 = \frac{4}{3}Z_0 = 1{,}33 \cdot Z_0 \ \textit{при} \ \theta = 60°;$$

$$OO_2 = \frac{\sqrt{28}}{3}Z_0 = 1{,}76 \cdot Z_0 \ \textit{при} \ \theta = 90°.$$

Из приведенных данных следует, что минимальная величина поперечного смещения будет иметь место, когда направление смещения совпадает с осью одного из винтов.

Поэтому крепление объектива к киноаппарату должно происходить таким образом, чтобы ось одного из винтов лежала в плоскости, содержащей направление силы веса оправы.

Приведенный расчет также показывает, что наибольшее смещение за счет зазора почти в два раза превышает его допустимое значение. Сказанное позволяет правильно ориентироваться при выборе посадок в сопряжении винт – паз.

Цилиндрические направляющие неаксиального типа – конструкции на пинолях.

Известно два типа конструкций на пинолях, т.е. на цилиндрических стержнях.

В первом – пиноли крепятся своими концами в корпусной детали и по ним происходит перемещение подвижных компонентов. Во второй – пиноли жестко устанавливаются на оправах подвижных компонентов и совместно с ними перемещаются вдоль внутренних пазов корпуса объектива.

На рис.2.11 представлена принципиальная схема конструкции первого типа (пат.3106125 США), в которой подвижный компонент 1 перемещается вдоль неподвижных пинолей 2 и 2а (рис.2.12).

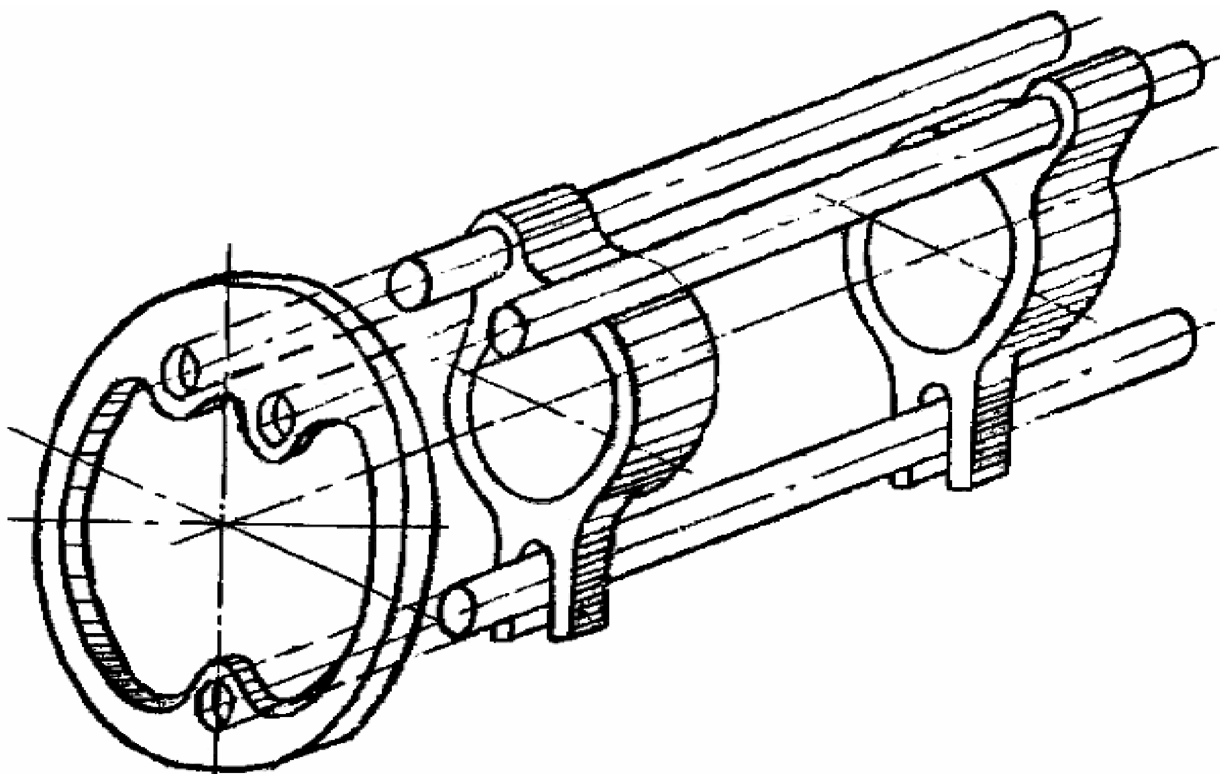


Рис. 2.11. Принципиальная схема объектива на пинолях

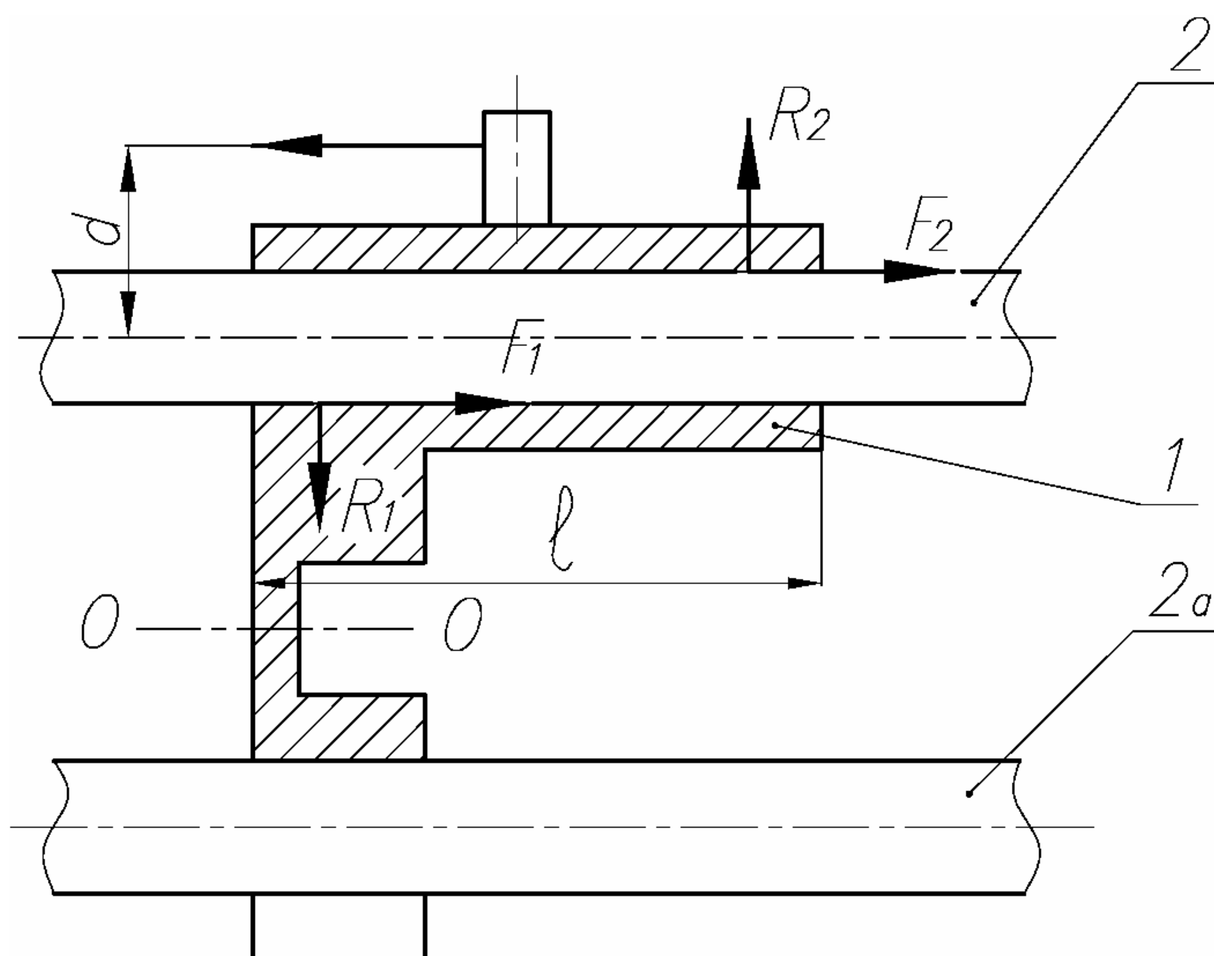


Рис. 2.12. Распределение усилий в направляющих на пинолях

Основным достоинством этой конструкции является то, что она позволяет прилагать значительно меньшие усилия для перемещения, чем в предыдущем варианте; обеспечивать большую плавность хода при той же и даже меньшей длине направляющих. Объясняется это тем, что величина плеча приложения силы в этом варианте обычно в несколько раз (5-8) меньше, чем в варианте с направляющими аксиального типа.

Из рассмотрения схемы следует $F = F_1 + F_2 = \frac{3Pd}{L}\mu$.

Явление самоторможения будет отсутствовать, если $P > F$. Отсюда $l > 3d\mu$.

Для обеспечения большей легкости хода и уменьшения износа рекомендуется выбирать размеры так, чтобы $l \geq 16d\mu$.

Например, для фрикционной пары (сталь-50, Д-16) («Вариогоир-2Б») коэффициент сухого трения равен $\mu \approx 0{,}2\,мм$; $d = 4\,мм$; длина направляющей l должна быть не менее 12,8 мм.

В конструкции объектива длина направляющей l принята равной 20 мм, что вполне достаточно для обеспечения плавности хода.

Определим поперечное смещение оси О-О отверстия несущей оправы в зазорах Z_1, Z_2 сопряжений пиноль – оправа и от погрешностей в координатах мест крепления концов пинолей.

Рассмотрим несколько вариантов расположения пинолей друг относительно друга и попытаемся определить вариант, позволяющий получить наименьшую величину смещения оси О-О отверстия оправы под оптику при различных направлениях силы тяжести относительно пинолей.

В общем случае радиальные зазоры Z_1, Z_2 между пинолями и отверстиями не равны между собой (рис.2.12). Пусть $Z_2 > Z_1$, тогда при смещении оправы в направлении, определяемом углом μ, центр оправы 0 сместится на величину $OO_1 = Z_1$ в положение O_1. При дальнейшем действии усилия в этом направлении произойдет разворот оправы вокруг точки N на угол γ в зазоре $AC = \dfrac{BC}{\cos\varphi}$ сопряжения оправа – пиноль 2а. Центр оправы займет новое положение O_2. Определим величину результирующего смещения оси оправы $O - O_2$. Очевидно $OO_2 = \sqrt{OO_3^2 + O_2O_3^2}$. Из рис.2.13 следует

$$\left.\begin{aligned} OO_3 &= OO_1 \cos\mu + O_1O_2 \cos\beta \\ O_2O_3 &= OO_1 \sin\mu + O_1O_2 \sin\beta \end{aligned}\right\},$$

где

$$OO_1 = Z_1;$$

$$\sin\beta = \frac{EO_1}{NO_1} = \frac{a + r\cos\mu}{NO_1};$$

$$\cos\beta = \frac{EN}{NO_1} = \frac{b - r\sin\mu}{NO_1}.$$

$$O_1O_2 = NO_1 \cdot \gamma_1;$$

$$\gamma = \frac{AC}{CN};$$

$$AC = \frac{BC}{\cos\varphi};$$

$$BC = Z_2 - Z_1 \cos\mu;$$

$$\cos\varphi = \frac{R + b - r\sin\mu}{CN}.$$

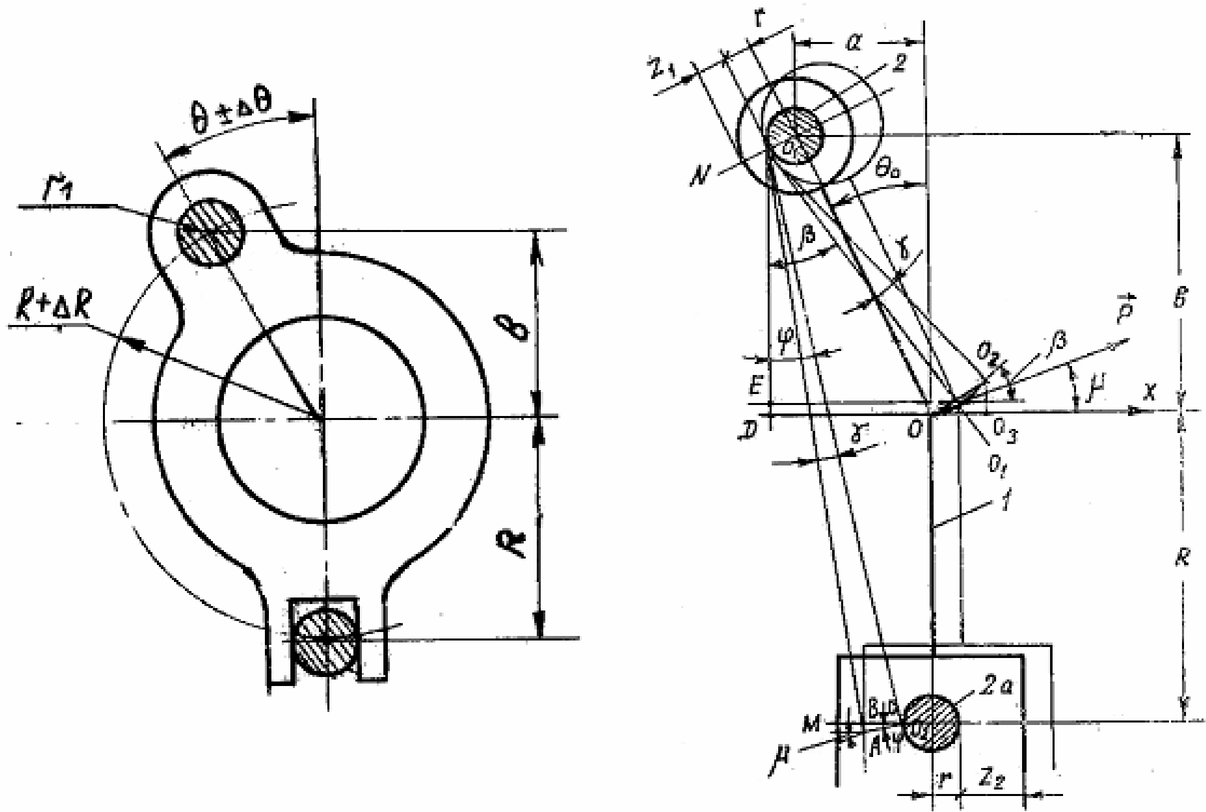


Рис. 2.13. Схема для расчета смещений компонента в зазорах Z_1 и Z_2

Отсюда

$$\gamma = \frac{Z_2 - Z_1 \cos\mu}{R + b - r\sin\mu}.$$

Подставив значения OO_1, OO_2, $\cos\beta$, $\sin\beta$ в выражения для OO_3, O_2O_3, получим:

$$OO_3 = Z_1 \cos\mu + \gamma(b - r_1 \sin\mu);$$
$$O_2O_3 = Z_1 \sin\mu + \gamma(a - r_1 \sin\mu).$$

Окончательно

$$OO_2 = \sqrt{(Z_1 \cos\mu + \gamma(b - r_1 \sin\mu))^2 + (Z_1 \sin\mu + \gamma(a + r_1 \cos\mu))^2}. \quad (1)$$

Полученное выражение справедливо для углов $(270° + \theta) \le \mu \le (90° + \theta)$. Для остальной области углов $(90° + \theta) \le \mu \le (270° + \theta)$ следует применять формулу

$$OO_2 = \sqrt{(Z_1 \cos\mu - \gamma(b - r_1 \sin\mu))^2 + (Z_1 \sin\mu - \gamma(a + r_1 \cos\mu))^2}, \quad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{Z_2 + Z_1 \cos\mu}{R + b - r_1 \sin\mu}.$$

При эксплуатации объектива возможны различные его положения относительно направления силы тяжести P. Рассмотрим случаи, когда угол μ, задающий направление смещения, равен 0°, 90°, 180° и 270°. Величина результирующего смещения OO_2 для каждого из них будет определяться следующими выражениями:

1. $\mu = 0°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)b}{R+b}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(a + r_1)}{R+b}\right)^2}\,.$$

2. $\mu = 90°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(\frac{b - r_1}{R+b-r_1} Z_2\right)^2 + \left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot a}{R+b-r_1}\right)^2}\,.$$

3. $\mu = 180°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)b}{R+b}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(a - r_1)}{R+b}\right)^2}\,.$$

4. $\mu = 270°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(\frac{Z_2}{R+b+r_1}(b + r_1)\right)^2 + \left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot a}{R+b+r_1}\right)^2}\,.$$

Если положение пинолей задано в полярных координатах (β, R) и угол $\beta = \theta$ отсчитывается от оси, проходящей через ось системы объектива 0-0 и центр пиноли Q, а R – расстояние от оси системы объектива 0-0 до центров пинолей, то для получения суммарного смещения OO_2 необходимо в формулы (1) и (2) вместо b и a подставить $R \cdot \cos\theta$ и $R \cdot \sin\theta$.

Рассмотрим второй вариант конструкции на пинолях (табл.3, второй вариант), когда угол, определяющий положение оси OQ_1 равен $\theta°$, и оценим суммарную величину смещений центра оправы компонента в зазорах Z_1, Z_2 для различных направлений смещения μ: 0°, 90°, 180°, 270°.

Так как вывод соответствующих формул ничем не отличается от предыдущего варианта, то сразу приведем окончательные результаты вычислений:

1. $\mu = 0°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)}{R+a} a\right)^2 + \left((Z_2 + Z_1)\frac{b + r_1}{R+a}\right)^2}\,.$$

2. $\mu = 90°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1) \cdot a}{R+a}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(b - r_1)}{R+a}\right)^2}\,.$$

3. $\mu = 180°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + Z_2 \frac{b}{R+a-r_1}\right)^2 + \left(Z_2 \frac{a - r_1}{R+a-r_1}\right)^2}\,.$$

4. $\mu = 270°$

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot b}{R+a+r_1}\right)^2 + \left(\frac{Z_2(a + r_1)}{R+a+r_1}\right)^2}\,.$$

Для перехода к полярным координатам необходимо в полученных выражениях вместо b и a подставить $R \cdot \cos\theta$ и $R \cdot \sin\theta$.

В третьем варианте конструкций на пинолях (табл.3, третий вариант) определим величину смещения OO_2 только для $\mu = 270°$, т.к. остальные направления смещений не имеют практической ценности. После несложных преобразований получим:

$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + (Z_1 + Z_2)\frac{a}{R+a}\right)^2 + \left((Z_2 + Z_1)\frac{b + r_1}{R - a}\right)^2}\ .$$

Результаты вычисления для различных схем расположения пинолей в полярных координатах сведены в табл.3. В последней (5) колонке таблицы приведены расчетные значения смещений OO_2 для $Z_1 = Z_2 = 0{,}01$; $R = 132$ *мм*, $r_1 = 1{,}25$ *мм*; $\theta_0 = 13°$.

Анализ этих значений позволяет сделать вывод, что при одних и тех же условиях первый вариант конструкции обеспечивает более высокую точность расположения подвижного компонента, чем два последующих.

Таблица 3

Номер схемы	Принципиальная схема расположения пинолей	Направление смещения, μ	Выражение для результирующего смещения OO_2	Смещение оправы при $\theta_0=13^\circ$ $R=13{,}2$мм $r=1{,}25$мм $Z_1=Z_2=0{,}01$
I	2	3	4	5
ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ				
I.I		0°	$\left[\left(Z_1+(Z_2-Z_1)\cdot\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_0+1}\right)^2+\left((Z_2-Z_1)\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0+r}{R\cdot(\cos\theta_0+1)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
I.2		90°	$\left[\left(Z_1+Z_2\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0}{R\cdot(\cos\theta_0+1)-r}\right)^2+\left(Z_2\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0-r}{R\cdot(\cos\theta_0+1)-r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,012
I.3		180°	$\left[\left(Z_1+(Z_2-Z_1)\cdot\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_0+1}\right)^2+\left((Z_2-Z_1)\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0-r}{R\cdot(\cos\theta_0+1)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
I.4		270°	$\left[\left(Z_1+Z_2\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0}{R\cdot(\cos\theta_0+1)+r}\right)^2+\left(Z_2\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0+r}{R\cdot(\cos\theta_0+1)+r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,012

Продолжение таблицы 3

I	2	3	4	5
ВТОРОЙ ВАРИАНТ				
2.I		0°	$\left[\left(z_1+(z_2-z_1)\cdot\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta_0+1}\right)^2+\left((z_2-z_1)\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0-r}{R\cdot(\sin\theta_0+1)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
2.2		90°	$\left[\left(z_1+z_2\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0}{R\cdot(\sin\theta_0+1)-r}\right)^2+\left(z_2\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0-r}{R\cdot(\sin\theta_0+1)-r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,018
2.3		180°	$\left[\left(z_1+(z_2-z_1)\cdot\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta_0+1}\right)^2+\left((z_2-z_1)\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0+r}{R\cdot(\sin\theta_0+1)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
2.4		270°	$\left[\left(z_1+z_2\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0}{R\cdot(\sin\theta_0+1)+r}\right)^2+\left(z_2\cdot\frac{R\cdot\sin\theta_0+r}{R\cdot(\sin\theta_0+1)+r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,017
ТРЕТИЙ ВАРИАНТ				
3.I		0°	$\left[\left(z_1+(z_1+z_2)\cdot\frac{\sin\theta_0}{1-\sin\theta_0}\right)^2+\left((z_1+z_2)\cdot\frac{R\cdot\cos\theta_0+r}{R\cdot(1-\sin\theta_0)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	0,030

Рассмотрим влияние погрешностей расположения ΔR и $\Delta\theta$ мест крепления несущей пиноли Q на величину смещения центра несущей оправы подвижного компонента с оси системы объектива.

Допустим, что отверстие в корпусе объектива для установки в нем конца пиноли при изготовлении сместилось с расчетного положения Q_1 в новое положение Q_1' на величину ΔR (рис.2.14). Очевидно, при креплении конца пиноли в отверстии, занявшем новое положение, центр O несущей оправы сместится с оси объектива. Определим величину этого смещения.

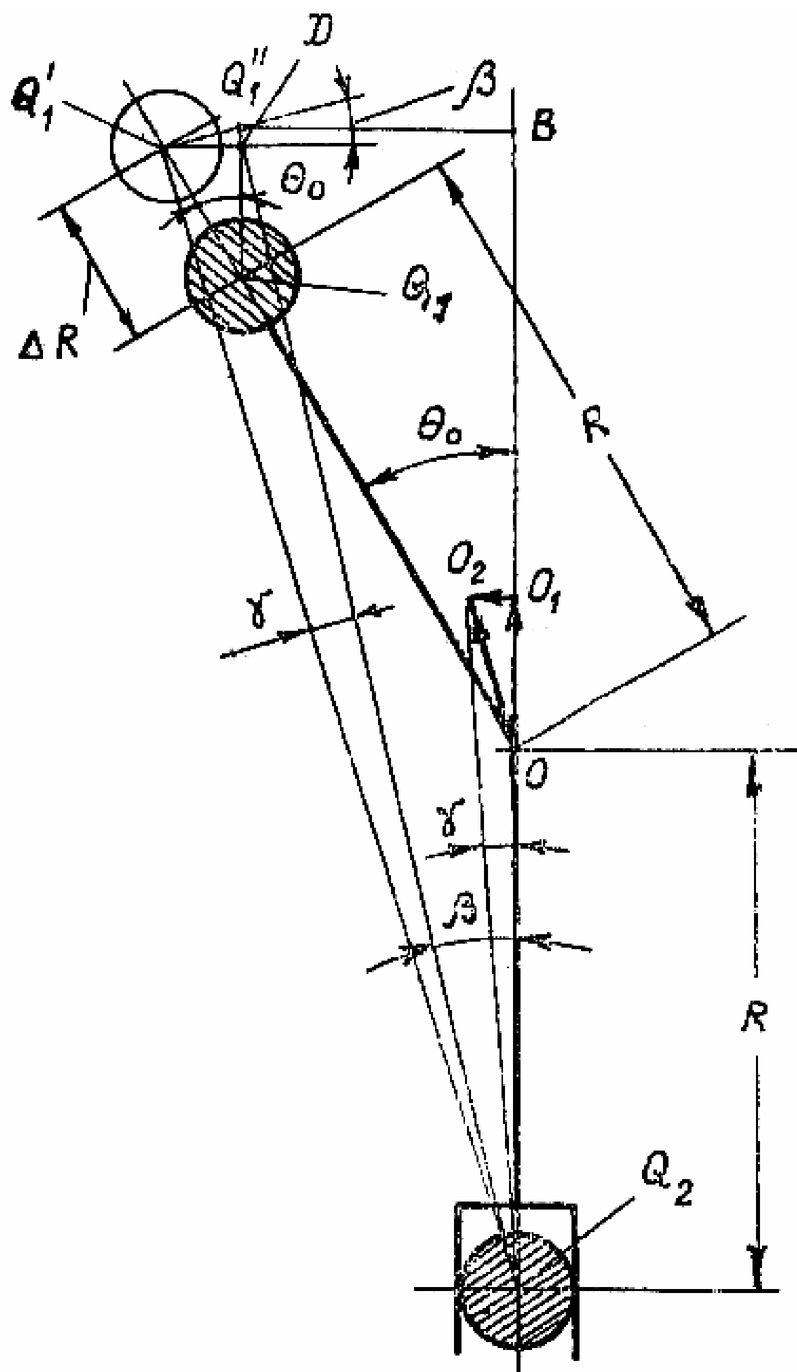


Рис. 2.14. Схема для расчета смещения компонента от погрешности ΔR

Процесс перемещения пиноли из расчетного положения в новое можно представить в виде двух движений: перемещения вверх на величину Q_1,Q_1'' и разворота пиноли на угол γ вокруг центра Q_2 второй пиноли. При этом центр O несущей оправы сместится с оси объектива соответственно на величины OO_1 и O_1O_2.

В результате суммарное смещение OO_2 будет определяться выражением

$$OO_2 = \sqrt{OO_1^2 + O_1O_2^2}\,,$$

где

$$OO_1 = Q_1Q' = Q_1D + DQ_1'' = \Delta R \cdot \cos\theta_0 + Q_1'D \cdot tg\beta\,.$$

Здесь

$$Q_1'D = \Delta R \cdot \sin\theta_0\,,$$

$$tg\beta = \frac{Q_1''B}{Q_2B}\,,$$

$$Q_1''B = R \cdot \sin\theta_0\,,$$

$$Q_2B = R(1+\cos\theta_0)\,.$$

После подстановки значений $Q_1'D$ и $tg\beta$ в выражение для OO_1 получим

$$OO_1 = \Delta R\,.$$

Из рис.2.13 следует:

$$O_1O_2 = R \cdot \gamma\,,$$

$$\gamma = \frac{Q_1'Q_1''}{Q_1''Q_2}\,,$$

где

$$Q_1'Q_1'' = \frac{Q_1'D}{\cos\beta},\; Q_1'D = \Delta R \cdot \sin\theta_0,\; \cos\beta = \frac{Q_2B}{Q_2Q_1''}$$

Здесь

$$Q_2B = R(1+\cos\theta_0),\; Q_2Q_1'' = \sqrt{Q_2B^2 + BQ_1''^2}\,,$$

Так как $BQ_1'' = R \cdot \sin\theta_0$, то

$$Q_2Q_1'' = R\sqrt{2(1+\cos\theta_0)},\; \cos\ \beta\ =\ \sqrt{0,5(1\ +\ \cos\ \theta_0)}$$

Окончательно

$$Q_1'Q_1'' = \frac{\Delta R \cdot \sin\theta_0}{\sqrt{0,5(1+\cos\theta_0)}}\,.$$

Поскольку $\Delta R << R$, то можно считать $Q_2Q_1 = Q_2Q_1''$.

Поэтому

$$\gamma\ =\ \frac{\Delta R\ \cdot \sin\ \theta_0}{R\,(1\ +\ \cos\ \theta_0)}\,.$$

Следовательно, $O_1O_2 = \dfrac{\Delta R \cdot \sin\theta_0}{1+\cos\theta_0}$.

Подставим значения OO_1 и O_1O_2 в формулу для OO_2:

$$OO_2 = \sqrt{\Delta R^2 + \frac{\Delta R^2 \cdot \sin^2\theta_0}{(1+\cos\theta_0)^2}} = \frac{\Delta R}{\cos\theta_0/2}.$$

Определим смещение центра оправы OO_2' от наличия погрешности в угле θ_0.

Из рис.2.15 следует, что $OO_2' = \sqrt{OO_1'^2 + O_1'O_2'^2}$, где

$$OO_1' = Q_1O_1' = QC - Q_1'C = R\Delta\theta_0 \cdot \sin\theta_0 - R\Delta\theta_0 \cdot \cos\theta_0 \cdot tg\beta.$$

Но

$$tg\beta = \frac{Q_1'D}{Q_2D} = \frac{\sin\theta_0}{1+\cos\theta_0}.$$

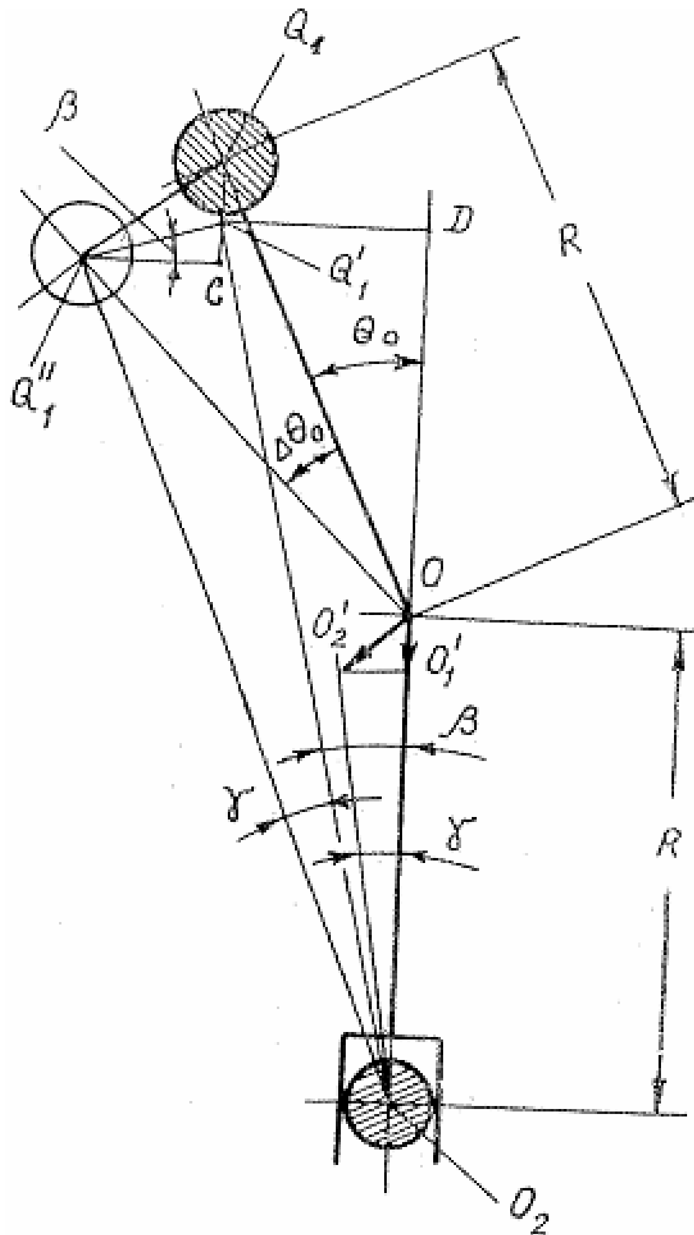


Рис. 2.15. Схема для расчета смещения компонента от погрешности $\Delta\theta_0$

Поэтому

$$OO_1' = Q_1Q_1' = \frac{R\Delta\theta_0 \sin\theta_0}{1+\cos\theta_0},\ O_1'O_2' = R\cdot\gamma,$$

Где

$$\gamma = \frac{Q_1Q_1''}{Q_2Q_1'},$$

$$O_1'O_1'' = \frac{Q_1''C}{\cos\beta};\ Q_1''C = \Delta\theta_0 R\cdot\cos\theta_0,$$

$$\cos\beta = \frac{Q_2D}{Q_2Q_1'} = \sqrt{\frac{1+\cos\theta_0}{2}}$$

Здесь $Q_2Q_1' = R\sqrt{2(1+\cos\theta_0)}$.

Подставив значения $Q_1'Q_1''$ и Q_2Q_1' в выражение для γ, получим

$$\gamma = \frac{\cos\theta_0}{1+\cos\theta_0}\Delta\theta_0.$$

Следовательно,

$$O_1'O_2' = \frac{\cos\theta_0}{1+\cos\theta_0}R\Delta\theta_0.$$

Окончательно

$$OO_2' = \frac{R}{1+\cos\theta_0}\Delta\theta_0.$$

Если предположить, что погрешности ΔR и $\Delta\theta_0$ подчиняются нормальному закону распределения, то результирующее смещение центра оправы будет описываться нормальным законом на плоскости, модуль смещения которого – законом, близким к рэлеевскому. Поэтому для допустимого смещения несущей оправы от погрешностей $\pm\Delta R$ и $\pm\Delta\theta_0$ можно записать

$$\delta_\Sigma = \frac{1}{k_\Sigma}\sqrt{\frac{R^2}{(1+\cos\theta_0)^2}\Delta\theta_0^2 + \frac{1}{\cos^2 \theta_0/2}\Delta R^2},$$

где δ_Σ - допустимое суммарное смещение центра несущей оправы, k_Σ - коэффициент относительного рассеяния для распределения, подчиняющегося закону Рэлея.

Практические расчеты серийно идущих объективов показали, что выведенные выражения для определения погрешностей положения подвижного компонента в объективе позволяют достаточно обоснованно

выбирать необходимый вариант конструкции на пинолях и задавать допуски на сопряжение деталей объектива.

Другим оригинальным и широко применяемым решением направляющих неаксиального типа является конструкция Анженье. Отличие ее от варианта, рассмотренного выше, заключается в том, что если в предыдущей конструкции пиноли жестко крепятся к корпусу и его неподвижным деталям, то в конструкции Анженье пиноли крепятся на оправах подвижных компонентов (рис.2.16).

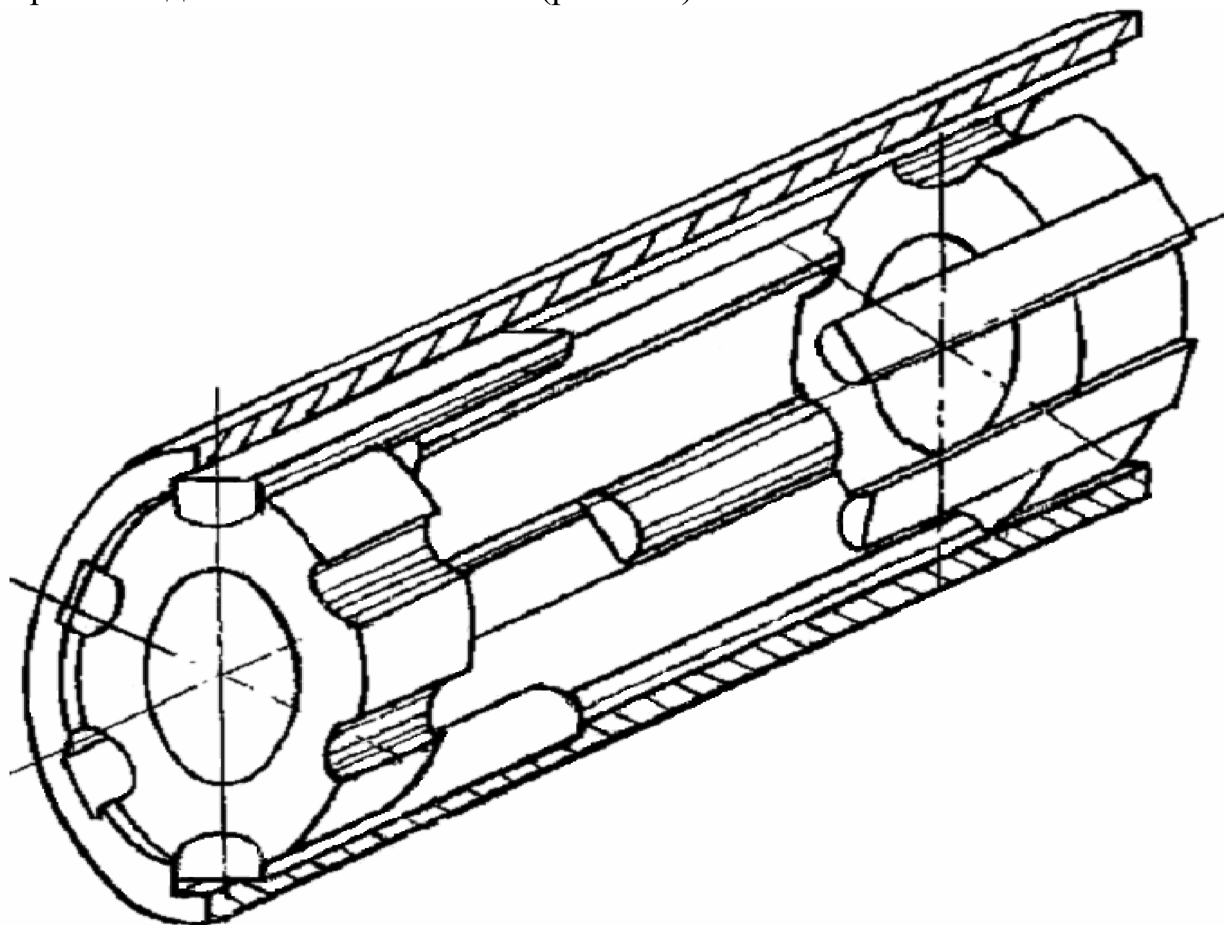


Рис. 2.16. Принципиальная схема конструкции Анженье

Определим величину поперечного смещения OO_3 компонента с оптической оси объектива. Для чего рассмотрим рис.2.17, на котором схематично представлена оправа с пинолями радиуса r в корпусе объектива. Углы $\theta_1 = \theta_2 = 90°$, $\theta_3 = 180°$ (вариант 1).

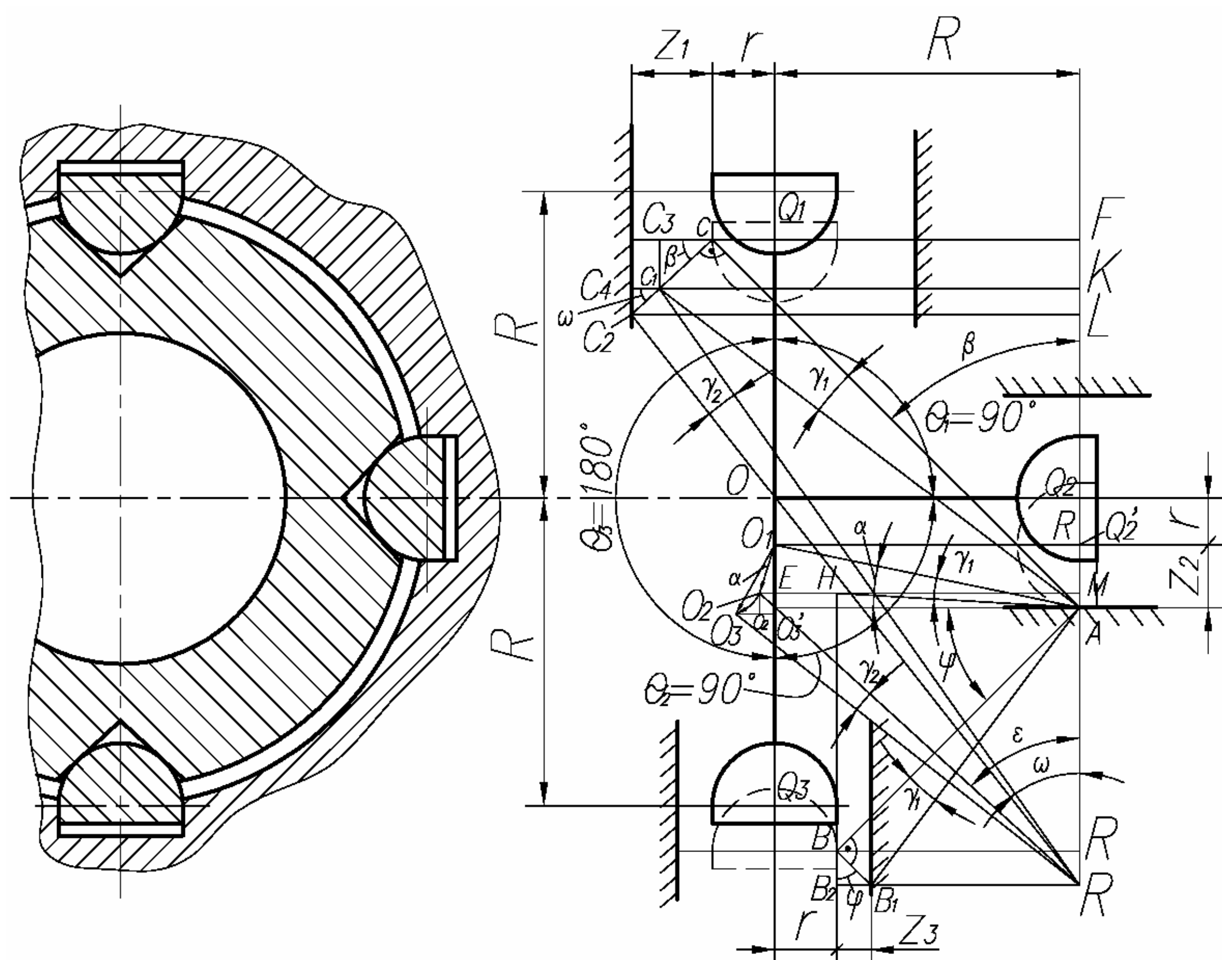


Рис. 2.17. Принципиальная схема конструкции направляющих Анженье и схема расчета смещений компонента в зазорах Z_1, Z_2 и Z_3

В общем случае $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$. Допустим $Z_1 > Z_2 > Z_3$, $OQ_1 = OQ_2 = OQ_3 = R$. Пусть оптическая ось компонента, след которой на рис. 2.15в обозначен через O, сместится в зазоре Z_2 на величину $OO_1 = Z_2$ в направлении, определяемом силой веса компонента. При этом пиноль Q_2 займет новое положение Q_2' и коснется стенки паза корпуса в точке A. Далее под действием веса оправы компонента развернется вокруг точки A на угол γ_1, равный

$$\gamma_1 = \frac{BB_1}{BA},$$

где

$$BB_1 = \frac{Z_3}{\sin\varphi},$$

$$BA = \frac{B_1H}{\sin\varphi} = \frac{R-r}{\sin\varphi}.$$

Отсюда

$$\gamma_1 = \frac{Z_3}{R-r}.$$

Разворот оправы в зазоре Z_3 на угол γ_1, вызовет дополнительное смещение центра оправы на величину $O_1O_2 = O_1A \cdot \gamma_1$. Определим это смещение. Из треугольника AO_1E находим, что $O_1A = \sqrt{R^2 + r^2}$. Отсюда

$$O_1O_2 = \frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{R - r} Z_3 ,$$

$$O_2O_2' = O_1O_2 \cdot \sin\alpha$$

$$O_1O_2' = O_1O_2 \cdot \cos\alpha ,$$

где

$$\cos\alpha = \frac{AE}{AO_1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}} ; \ \sin\alpha = \frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}} .$$

Поэтому

$$O_1O_2' = \frac{R}{R - r} Z_3 ;$$

$$O_2O_2' = \frac{r}{R - r} Z_3 .$$

При развороте оправы на угол γ_1, опорная точка C пиноли Q_1 займет новое положение, определяемое точкой C_1.

После того, как пиноли Q_2 и Q_3 упрутся в стенки пазов корпуса объектива, соответственно в точках A и B_1, пиноль Q_1 под действием веса получит дополнительный разворот в оставшемся зазоре C_1C_4 на угол γ_2 вокруг мгновенного центра вращения *Д*. Этот разворот приведет к смещению центра оправы из положения O_2 в положение O_3. Определим это смещение

$$O_2O_3 = DO_2 \cdot \gamma_2 ,$$

где

$$\gamma_2 = \frac{C_2C_1}{DC_1} ;$$

$$C_2C_1 = \frac{C_1C_4}{\cos\omega} ,$$

но

$$\cos\omega = \frac{DK}{DC_1} , \ C_1C_4 = Z_1 - CC_3 ;$$

$$DK = 2R ;$$

$$CC_3 = C_1C \cdot \cos\beta , \ \cos\beta = \frac{AF}{AC} ;$$

$$C_1C = AC \cdot \gamma_1 ,$$

$$AF = R + r$$

Отсюда

$$CC_3 = (R + r)\gamma_1$$

$$\gamma_2 = \frac{Z_1 - (R + r)\gamma_1}{2R} .$$

Окончательно

$$O_2O_3 = DO_2 \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2R},$$

$$O_2O_2'' = O_2O_3 \cdot \sin\varepsilon, \ \cos\varepsilon \cong \frac{R}{DO_2}.$$

$$O_2''O_3 = O_2O_3 \cdot \cos\varepsilon, \ \sin\varepsilon \cong \frac{R}{DO_2}.$$

Следовательно

$$O_2O_2'' = \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2},$$

$$O_2''O_3 = \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2}.$$

Результирующее смещение будет равно

$$OO_3 = \sqrt{(OO_1 + O_1O_2' + O_2'O_2'')^2 + (O_2O_2' + O_3O_2'')^2}$$

или после подстановки

$$OO_3 = \frac{1}{2}\sqrt{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3)^2 + (Z_1 - Z_3)^2}.$$

Приведем результирующее смещение для второго варианта конструкции, в котором углы между направляющими пинолями равны $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 120°$.

$$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{3}(Z_2 + Z_3)^2 + \frac{1}{9}(2Z_1 + Z_3 - Z_2)^2}.$$

В третьем варианте $\theta_1 = \theta_3 = 135°$, $\theta_2 = 90°$, расчет результирующего смещения проводится аналогичным образом. Поэтому ниже приведем только выражение для суммарного смещения OO_3:

$$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(Z_3 + Z_2)^2 + \frac{1}{2(1+\sqrt{2})^2}(2Z_1 - Z_2 + Z_3)^2}.$$

Результаты вычислений смещений по трем вариантам крепления пинолей сведены в табл.4, в последней колонке 5 даны значения смещений OO_3 для $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0{,}02$.

Анализ данных табл.4 показывает, что при разработке конструкции на пинолях типа Анженье предпочтение следует отдать варианту II, позволяющему получать наименьшее поперечное смещение подвижного компонента в зазорах направляющих.

Таблица 4

Номер варианта	Принципиальная схема расположения пинолей	Углы между пинолями	Результирующее смещение компонента OO_3	Смещение OO_3 при $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0{,}02$ мм
1	2	3	4	5
1		$\theta_1 = 90°$ $\theta_2 = 90°$ $\theta_3 = 90°$	$OO_3 = 0{,}5\sqrt{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3)^2 + (Z_1 - Z_3)^2}$	0,04
2		$\theta_1 = 120°$ $\theta_2 = 120°$ $\theta_3 = 120°$	$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{3}(Z_2 + Z_3)^2 + \frac{1}{9}(2Z_1 + Z_3 - Z_2)^2}$	0,027
3		$\theta_1 = 135°$ $\theta_2 = 90°$ $\theta_3 = 135°$	$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(Z_3 + Z_2)^2 + \frac{1}{2(1+\sqrt{2})^2}(2Z_1 - Z_2 + Z_3)^2}$	0,031

2.4.6. Цилиндрический кулачок

Цилиндрический кулачок является наиболее ответственной деталью в объективе не только с точки зрения ее функционального назначения, но и также с точки зрения проектирования и изготовления. Поэтому часто цилиндрическому кулачку предъявляют требования, заметно противоречащие друг другу. В качестве примера можно рассмотреть цилиндрический кулачок к объективам современных ручных видеокамер. С одной стороны он должен отвечать требованию получения минимально возможного момента вращения. И это требование очень жесткое, так как полностью определяется мощностью, развиваемой отечественными, но еще довольно не совершенными электродвигателями, используемыми в этих камерах для изменения фокусного расстояния. С другой стороны, к вращению цилиндрического кулачка предъявляются определенные требования по шуму. И они также достаточно жесткие. Шум, издаваемый

подвижными частями объектива, не должен превышать 20-22 децибел. Это связано с использованием встроенных в камерах микрофонов. Оба эти требования для проектировщика достаточно противоречивы. Так, достижение минимально возможного момента вращения кулачка и плавность его хода в большинстве случаев требует перехода от трения скольжения (рис.2.18) к трению качения (рис.2.19).

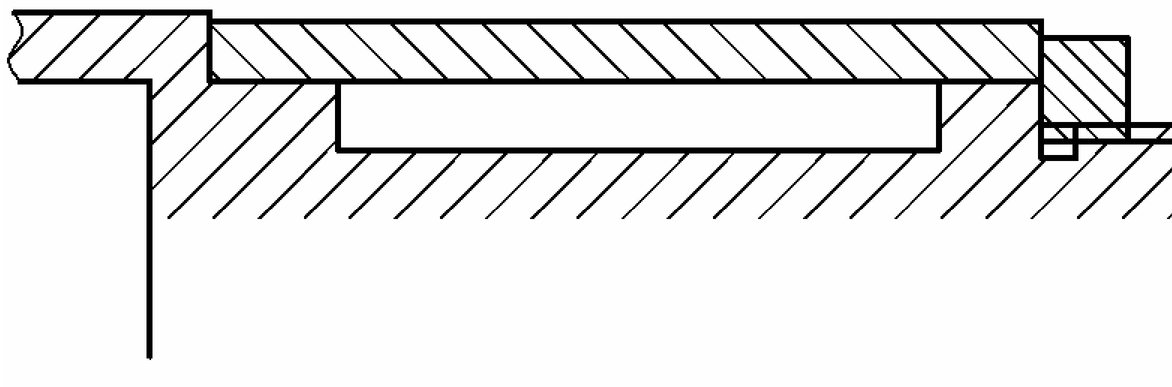


Рис. 2.18. Кулачок с трением скольжения

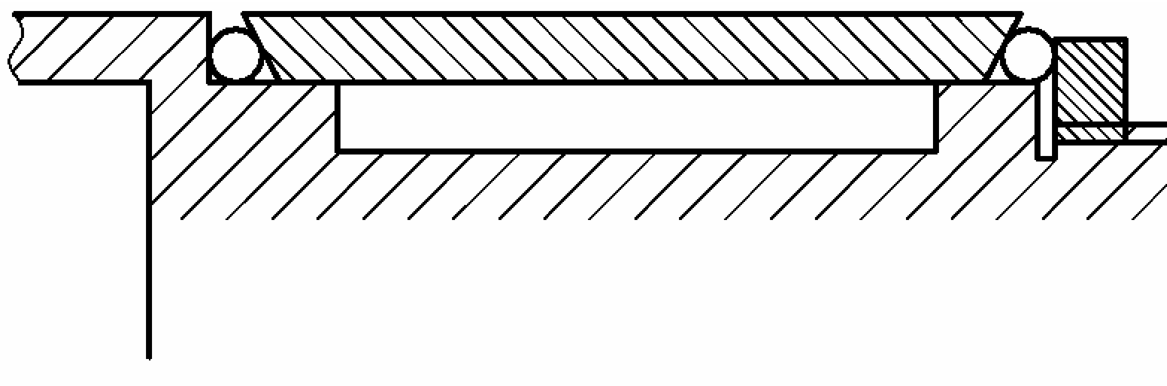


Рис. 2.19. Кулачок с трением качения

Но как замечено, этот переход всегда связан с появлением дополнительного шума, часто выходящего за допустимые пределы. К причинам его появления обычно относят микронеровности на поверхностях качения; проскальзывание за счет разности линейных скоростей в точках качения шариков, а в случае отсутствия сепараторов, задевание шариков друг за друга. Борьба с шумом в этих случаях идет по пути повышения чистоты рабочих поверхностей до ∇10 и выше, что может быть достигнуто применением алмазного точения; использованием сепараторов из антифрикционных материалов, таких как фторопласт-4; замены металлических шариков на неметаллические. Но как показал опыт, несмотря на всякие конструктивные и технологические ухищрения шума в таких конструкциях всегда больше, чем в конструкциях с трением скольжения. Поэтому радикальное уменьшение шума обычно связывают с

использованием в объективах трения скольжения. Но и в этом случае стремятся уменьшить трение за счет применения различного рода антифрикционных покрытий. Именно по этому пути пошли многие японские и американские фирмы при создании ручных телевизионных видеокамер.

В отечественных объективах также используются различные покрытия. Но чаще всего это фторопласт или фторопласт с различными наполнителями. Наносятся они либо напылением, либо окунанием в раствор. В обоих случаях толщина антифрикционного слоя, как правило, не мерная и колеблется от нескольких микрон до десятых долей миллиметра. В связи с чем кулачки требуют дополнительной обработки. Применение кулачков на трении скольжения более перспективно еще и потому, что объектив в этом случае получается легче и проще в сборке и юстировке.

При компоновании объектива цилиндрический кулачок размещается внутри корпуса или снаружи.

Расположение кулачка снаружи корпуса выгодно тем, что в этом случае значительно облегчается сборка и юстировка объектива, особенно, выставка его подвижных компонентов; упрощается конструктивная схема автозумма и доступ ко всем его узлам на этапе окончательной сборки аппарата.

К преимуществам расположения цилиндрического кулачка внутри корпуса следует отнести большую пыле- и грязезащищенность кулачков, приближения точек приложения сил, перемещающих подвижные компоненты, к направляющим поверхностям скольжения. Внутренне расположение цилиндрических кулачков применяется также в тех случаях, когда на корпусе объектива необходимо разместить механизмы и устройства, например, электродвигатели, гальванометры, электросхемы и т.д., по тем или иным причинам не помещающиеся в корпусе аппарата.

Криволинейные пазы, обеспечивающие перемещение подвижных компонентов по требуемым законам, могут быть нанесены на корпусе объектива или на отдельной цилиндрической оправке.

Нарезание пазов на отдельной оправке имеет ряд существенных преимуществ перед нанесением их на корпусе объектива. К этим преимуществам, в первую очередь, следует отнести отсутствие вращения подвижных компонентов в корпусе объектива при их перемещении вдоль оптической оси. Наличие такого вращения из-за погрешностей изготовления корпуса (неправильность геометрической формы отверстия корпуса вдоль всего посадочного места) может привести к заметному нарушению центрировки объектива и этим заметно ухудшить качество изображения. Именно поэтому нарезание пазов в корпусе применяется в объективах с невысокими выходными параметрами. Нарезание пазов на отдельной цилиндрической оправке значительно технологичнее, чем нарезание в корпусе по той причине, что в этом случае требуются менее

сложные устройства и приспособления для изготовления и контроля. В случае возникновения недопустимых погрешностей изготовления брак кулачков, полученных на отдельной оправке, обходится производству дешевле, чем брак корпусной детали, которая, как правило, является более сложной и трудоемкой.

К недостаткам использования цилиндрических оправ с пазами следует отнести возможность возникновения перемещений вдоль оптической оси объектива от биения торца корпуса, к которому поджимается кулачок, и попадания грязи, пыли, стружки в места сопряжения опорных торцов. Все эти факторы могут вызвать неучитываемые перемещения подвижных компонентов вдоль оси объектива. При нарезании пазов в корпусе отмеченные погрешности отсутствуют.

Кроме рабочих пазов, задающих соответствующий закон перемещения подвижным компонентам, на кулачке нарезается или радиальный паз, концы которого служат ограничителями разворота кулачка, или устанавливается упор, который при разворотах кулачка замыкает (размыкает) контактные группы, закрепленные на корпусе объектива в момент приближения к верхним или нижним границам диапазона изменения фокусного расстояния. Кроме того, на кулачке предусматривается место для применения зубчатого сектора, передающего вращательный момент на кулачок с электропривода камеры. Наконец, на кулачке должны быть предусмотрены технологические пазы или отверстия для юстировки переменных контрольных воздушных промежутков.

2.4.7. Материалы

Кулачковые механизмы в объективостроении отличаются характерной особенностью, заключающейся в том, что размеры кулачков в объективах преимущественно небольшие, усилия, необходимые для их вращения, составляют от 20-30 г до 1 кг, скорости до 5-10 об/мин, продолжительность непрерывной работы также мала, благодаря чему износ кулачков в приборах практически отсутствует. Исходя из изложенного и учитывая, что надежность кулачков определяется не износом, а точностью их изготовления, нет необходимости применять для них высокопрочные и легированные стали и тем самым усложнять технологию и повышать стоимость изготовления кулачка.

Выбор материалов для изготовления кулачков объективов связан с необходимостью решения задач уменьшения веса, трения в подвижных частях и упрощения технологии изготовления и сборки.

Стремление к уменьшению веса любительских объективов привело к тому, что алюминиевые сплавы Д-16Т, В-95, Д-1Т, Ал-2 и др. почти вытеснили ранее широко используемые стали 45 и 50 и латуни ЛС59-1, Л62. Применение латуней в настоящее время в основном связано с изготовлением роликов, винтов, направляющих типа пиноли и прокладных

шайб. Очевидно, дальнейшее уменьшение веса объективов, уменьшение трения их трущихся частей, упрощение технологии изготовления и сборки связано с применением пластмасс. Примеры использования пластмасс как в отечественном, так и зарубежном приборостроении имеются. Так, в объективах ПФ-3, «Агат-14» в некоторых трущихся парах используется фторопласт-4, обладающий превосходными антифрикционными свойствами и являющийся чрезвычайно износостойким материалом.

В объективе «Bolex Vario» (1:2,8) американского производства вся оправа третьего компонента, винты, входящие в направляющие пазы, и переходная оправа изготовлены из пластмасс типа твердого капрона и т.д.

Следует ожидать, что в недалеком будущем корпуса объективов и, что особенно важно, кулачки и шкалы, будут изготавливаться также из соответствующих сортов пластмасс.

2.4.8. Конструкция первого компонента

Особенность конструкции первого компонента связана с необходимостью продольного перемещения при фокусировке на снимаемый объект. К настоящему времени известно два типа конструкций первого компонента. В первом типе перемещение компонента осуществляется с помощью винтовых пазов, во втором - с помощью резьбового соединения, причем резьба может выполнять как функцию силового элемента, так силового и несущего элемента одновременно. В первом случае резьба служит только для перемещения компонента вдоль оси (поперечные смещения компонента в этом случае определяются посадкой цилиндрических оправ), во втором - для перемещения и придания необходимого положения в поперечном направлении относительно оси объектива.

К основным достоинствам первого типа конструкции относятся возможность получения меньшего поперечного сечения в зазоре между корпусом объектива и оправой первого компонента и меньших поперечных габаритов передней части объектива. Недостатками варианта являются большой заклон компонента при установке минимальной дистанции и значительные неудобства, связанные со сборкой на этапе выставки дистанционной шкалы.

Второй вариант лишен указанных недостатков, что и явилось основным условием его широкого распространения.

Крепление линз первого компонента в этом варианте осуществляется в основном тремя способами, приведенными ниже (рис.2.20).

При высоких требованиях к центрировке чаще всего применяется вариант (рис.2.20,в). В этом варианте децентрировка поверхностей определяется торцевым биением несущей оправы, поперечными смещениями в зазорах между оправами линз и несущей оправой, а также погрешностью автоколлимационной центрировки.

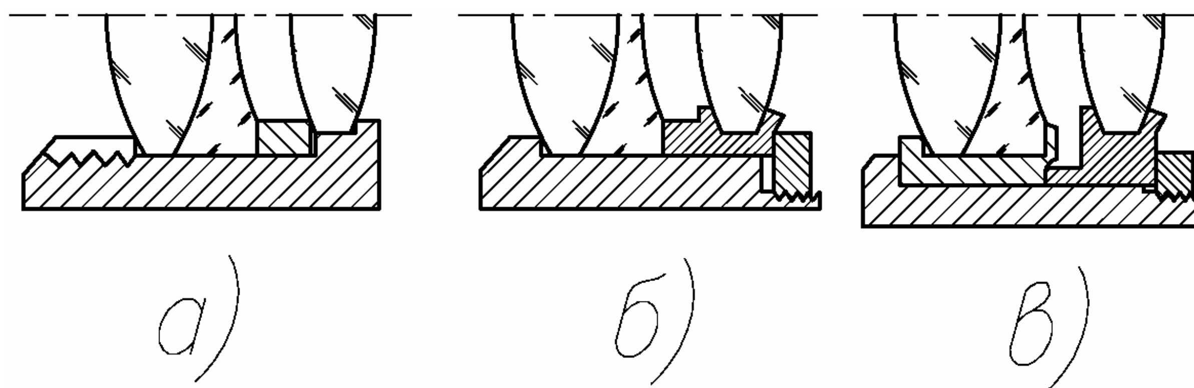


Рис. 2.20. Схема конструкции первого компонента

Вариант (рис.2.20,а) более технологичен и чаще применяется в объективах невысоких и средних параметров при серийном и массовом производстве. В этом варианте децентрировки поверхностей определяют биением торцов несущей оправы и гайки, зазором в резьбе, эксцентриситетом опорного диаметра гайки и резьбы, и собственной децентрировкой линз.

Вариант (рис.2.20,б) чаще всего применяется в тех случаях, когда нельзя использовать вариант (рис.2.20,а).

2.4.9. Последовательность проектирования первого компонента

При решении всех задач, возникающих при проектировании дистанционного (первого) компонента, конструктору необходимо все время держать в уме три самые важные проблемы: минимизация веса, габаритов и отклонения линз от своего расчетного положения. Линзы первого компонента, по сравнению с линзами других компонентов, во всех объективах переменного фокусного расстояния имеют наибольшие поперечные размеры. Поэтому именно они в большинстве случаев определяют поперечные габариты объективов. Следовательно, первую линзу, как самую большую в первом компоненте, желательно устанавливать непосредственно в корпус компонента без каких-либо промежуточных оправ. А толщину корпуса под первую линзу делать как можно меньше (1-1,5 мм). Что касается веса первого компонента, то он, как правило, очень велик. Так в телевизионном объективе «Вариогоир-47» вес первого компонента равен половине веса всех остальных линз объектива и поэтому, естественно, выворачивающий момент объектива из мест его крепления в корпусе аппарата будет зависеть не только от того, как далеко удален первый компонент от этих мест крепления, но и от того каков его вес. Таким образом, при проектировании конструкции первого компонента необходимо всячески стремиться к уменьшению веса, т.е., фактически, к уменьшению числа всевозможных оправ в нем.

Теперь перейдем к самому важному, к тому, что определяет качество изображения в объективе, а именно к точности расположения линз. Заметим, что всю последовательность проектирования, приводимую ниже, будем рассматривать на примере телевизионного объектива «Вариогоир-47» (1:1,8), который занимает некое среднее положение по своей сложности среди остальных объективов. Начнем анализ с самого ходового решения крепления линз - завальцовки с последующей автоколлимационной центрировкой (рис.2.21).

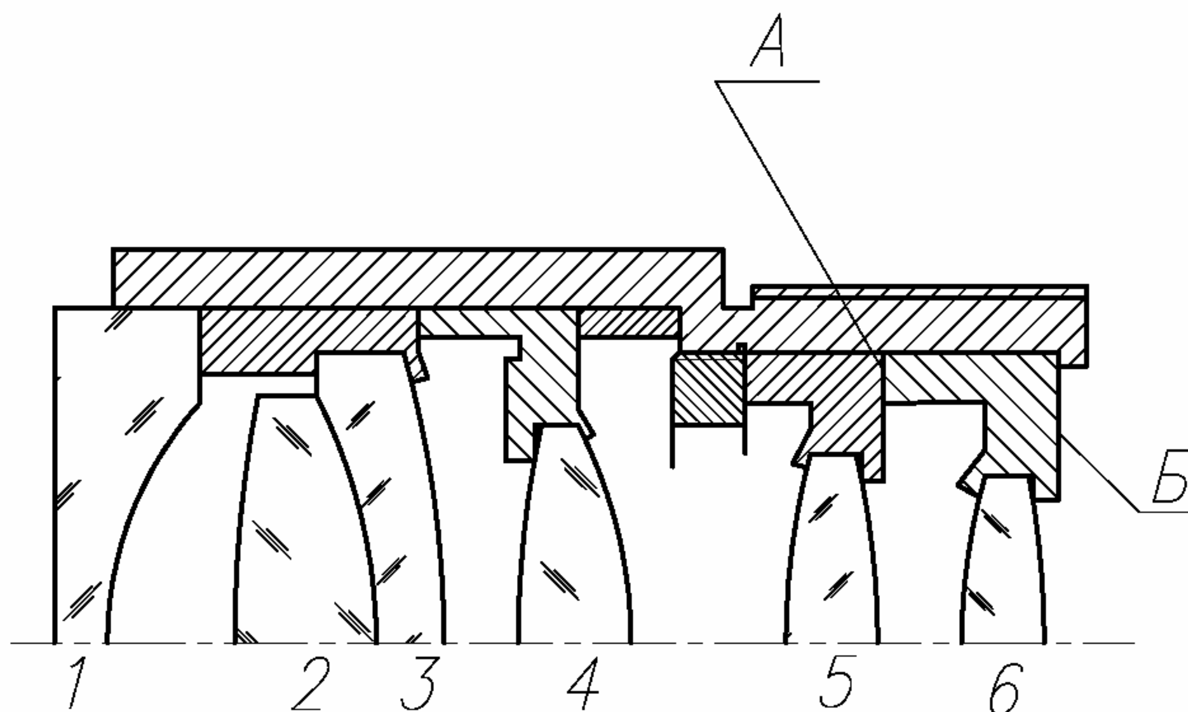


Рис. 2.21. Автоколлимационный вариант конструкции объектива

В этом варианте основными технологическими погрешностями, вызывающими децентрировки, являются: торцевые биения оправ и корпуса; поперечные смещения оправ с линзами в радиальных зазорах; собственные децентрировки оптических поверхностей линз, оставшиеся после автоколлимационной центрировки и конструкторские небрежности, неизбежно возникающие при создании эскизного решения. Посмотрим внимательно на рис.2.21 и особенно на ту его часть, которая содержит 5 и 6 линзы. Обращает на себя внимание расположение завальцовки. Оправа с 6 линзой неминуемо получит дополнительный заклон за счет непараллельности ее торцов *А* и *Б*. Эта непараллельность возникает когда оправу с завальцованной линзой устанавливают по технологической резьбе в плавающий патрон (рис.2.22) и затем, после центрировки с помощью ЮС-13, протачивают наружный посадочный диаметр *D* и торец *А*, выдерживая с необходимой точностью вершинный отрезок h_1, добиваются самого точного взаимного расположения поверхностей *А* и *D* и оптической оси линзы. После чего оправу отрезают в размер $b > h_2 + h_1 + d$ и

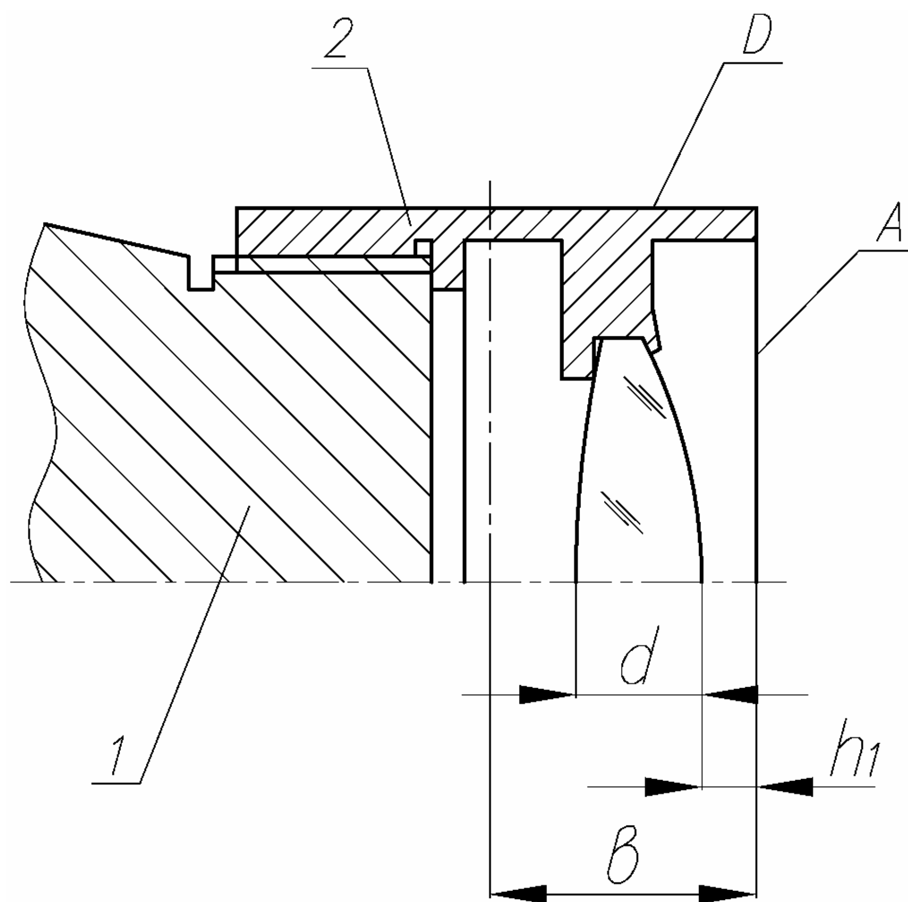


Рис. 2.22. Схема крепления оправы при автоколлимационной центрировке

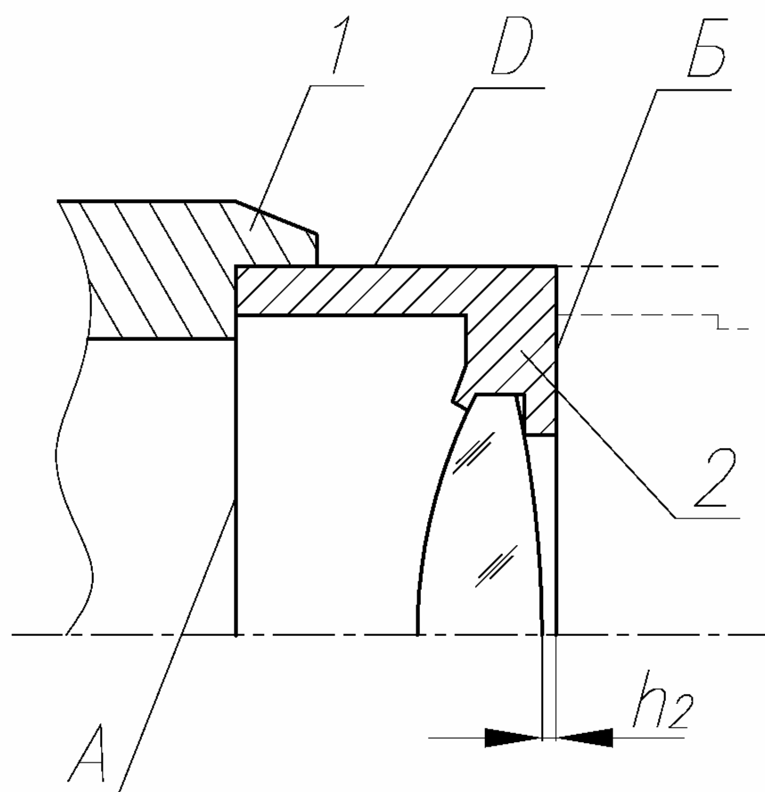


Рис. 2.23. Схема установки оправы в цанговый патрон

устанавливают на другой станок в цанговый патрон (рис.2.23) по поверхностям D и A. Для получения вершинного отрезка h_2 с необходимой точностью протачивают торец *Б*. Таким образом, торец *Б* протачивается со второй установки. На имеющемся отечественном заводском оборудовании это неминуемо приводит к биению торца *Б* относительно торца A.

Если мы хотим получить наивысшую точность расположения линзы в корпусе компонента, следует устанавливать оправу с линзой 6 по торцу A, находящемуся со стороны завальцовки.

Все вышесказанное относится и к оправе с линзой 6. Поэтому та часть компонента, которая содержит линзы 5 и 6 должна несколько измениться (рис.2.24).

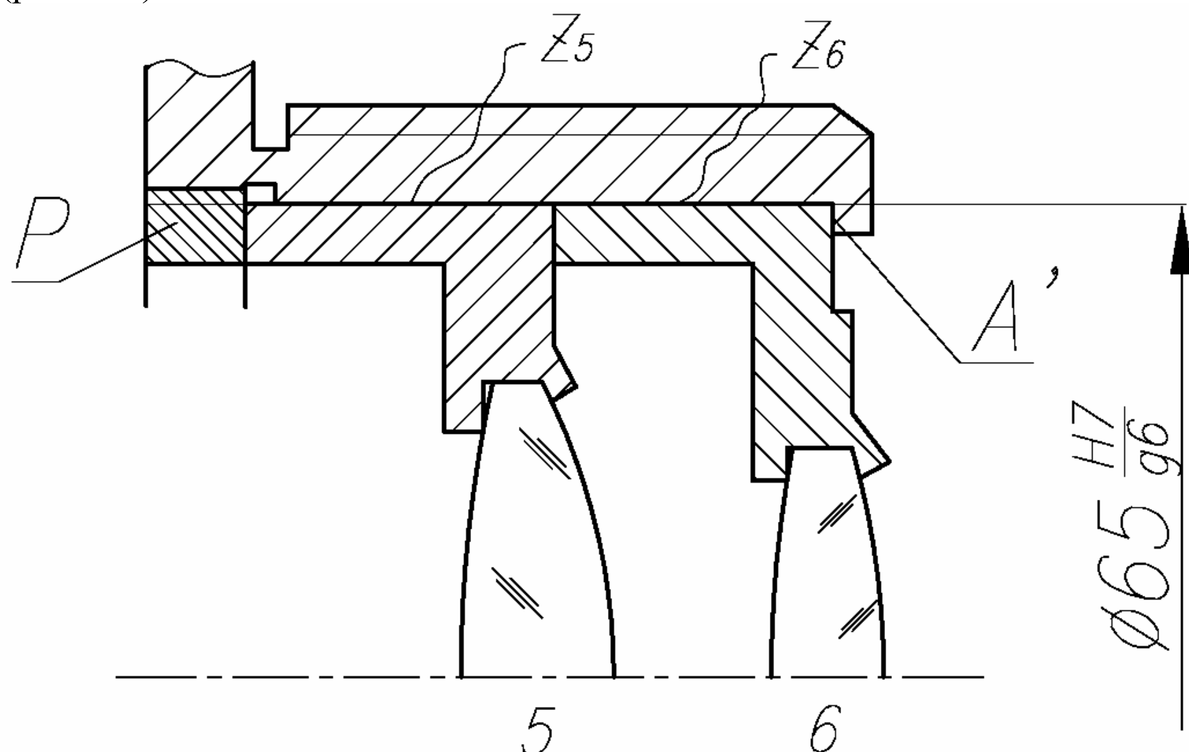


Рис. 2.24. Схема крепления оправ с линзами 5 и 6

Что же произойдет в этом случае при креплении оправ с линзами 5 и 6 в корпусе компонента. При заворачивании гайки P оправа с 6 линзой прижмется к торцу A' корпуса компонента. Если этот торец и посадочные диаметры под линзы обрабатывались с одной установки, то их взаимного биения не должно быть. Но мы хорошо знаем, что даже самая прекрасная технология на местах частенько нарушается. Поэтому и в наших проработках будем считать, что торец A' имеет небольшое, скажем 0,01 мм, торцевое биение. Тогда обе оправы заклонятся на угол

$$\gamma_{\Delta TA'} = \frac{0{,}01}{65} = 0{,}5',$$

что вызовет кому децентрировки

$$K_{5+6} = 0{,}5' \cdot 3{,}8 = 1{,}9 \ \textit{мкм}.$$

Здесь 3,8 – коэффициент влияния, взятый из таблиц влияния децентрировок на телевизионный объектив «Вариогоир-47».

Если учесть, что количество линз в объективе 24, и положение каждой из них определяется 3-4 технологическими ошибками, а исходное аберрационное пятно в плоскости наилучшей наводки составляет 18 мкм, то становится понятным, что заклон пятой и шестой линз на 0,5′ нежелателен.

Кроме совместного с шестой линзой заклона, оправа с пятой линзой получит дополнительный поворот за счет непараллельности торцов в оправе с шестой линзой. Пусть эта непараллельность составляет 0,02 мм. Тогда

$$\gamma_{\Delta TA'} = \frac{0{,}02}{65} = 1'.$$

И кома будет равна $K_5 = 1' \cdot 1{,}0 = 1$ *мкм*. Это тоже не так уж мало.

Кроме заклонов будут происходить поперечные смещения оправ с линзами в радиальных зазорах Z_5 и Z_6 между корпусом первого компонента и оправами. При посадке $\phi 65 \frac{H7^{(+30)}}{\partial 6_{(-30)}}$ радиальный зазор должен быть не более 30 мкм.

Кома от поперечного смещения в этом зазоре будет равна

$$K_5 = 30 \cdot 0{,}048 = 1{,}4 \ мкм,$$

$$K_6 = 30 \cdot 0{,}08 = 2{,}40 \ мкм,$$

где 0,044 и 0,08 – коэффициенты влияния.

Это уже довольно большие величины. И поэтому здесь следует перейти к приточке. Тогда радиальный зазор может быть уменьшен в два раза, и мы получим

$$K_5 = 15 \cdot 0{,}048 = 0{,}72 \ мкм,$$

$$K_6 = 15 \cdot 0{,}08 = 1{,}4 \ мкм.$$

Кроме этих погрешностей нельзя забывать о собственных децентрировках оптических поверхностей линз. Пусть они будут по 10 мкм. Тогда кома от них станет равна

$$K_{1-5} = 10 \cdot 0{,}049 = 0{,}5 \ мкм,$$

$$K_{2-5} = 10 \cdot 0{,}0014 = 0{,}014 \ мкм,$$

$$K_{1-6} = 10 \cdot 0{,}0325 = 0{,}32 \ мкм,$$

$$K_{2-6} = 10 \cdot 0{,}048 = 0{,}48 \ мкм.$$

В сумме это даст заметную величину. А поскольку точнее чем то, что мы использовали в расчетах, в цеховых условиях не получить, то следует подумать о разработке нового варианта крепления пятой и шестой линз.

Таким вариантом может быть решение, показанное на рис.2.25.

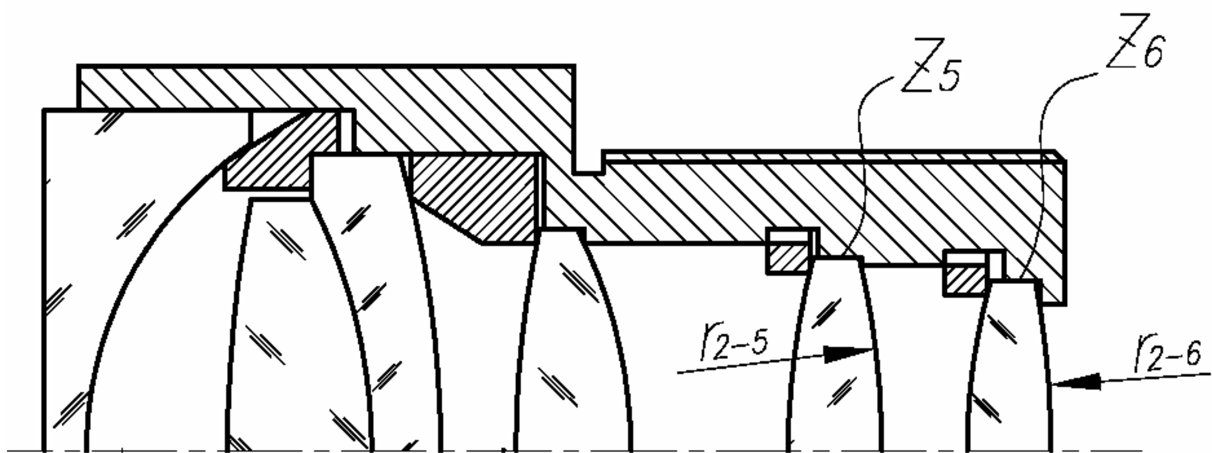


Рис. 2.25. Насыпной вариант

В отличии от предыдущего решения в этом варианте в зазорах Z_5 и Z_6 линзы будут разворачиваться вокруг центров кривизны опорных поверхностей.

Пусть $Z_5 = Z_6 = 15$ *мкм*. Углы разворотов линз будут равны

$$\gamma_{Z5} = \frac{Z_5}{r_{2-5}} = \frac{0{,}015}{5445} = 0{,}01';$$

$$\gamma_{Z6} = \frac{Z_6}{r_{2-6}} = \frac{0{,}015}{158} = 0{,}3'.$$

Они вызовут кому

$$K_5 = 0{,}01' \cdot 2 = 0{,}02 \ мкм;$$

$$K_6 = 0{,}3' \cdot 1 = 0{,}3 \ мкм.$$

Если сравнить эти значения комы децентрировок с теми, что мы получили в предыдущем варианте (0,72 и 1,40), то нетрудно увидеть, что кома от разворота пятой линзы в зазоре $Z_5 = 0{,}015$ *мм* будет в 36 раз меньше, чем от поперечного ее смещения в том же зазоре; кома от разворота шестой линзы в 4,7 раз меньше, чем от ее поперечного перемещения в том же зазоре $Z_6 = 0{,}015$ *мм*. Кому от собственных децентрировок первых поверхностей мы уже просчитывали. Они равны $K_{1-5} = 0{,}5$ *мкм* и $K_{1-6} = 0{,}32$ *мкм*. Таким образом, очевидно, что суммарная кома децентрировок в новом конструктивном решении значительно меньше, чем в первом, да и технологически она заметно проще. Поэтому остановимся на этом решении и перейдем к анализу базировки остальных линз первого компонента. Снова рассмотрим автоколлимационный вариант (рис.2.21). Из-за непараллельности торцов прокладного кольца, установленного за четвертой линзой, опирающиеся на него с первой по четвертую линзы, получают заклон на угол

$$\gamma_{\Delta T} = \frac{\Delta_T}{100}.$$

Пусть $\Delta_T = 0{,}02$ *мм*. Тогда $\gamma_{\Delta T} = 0{,}67'$, что вызовет кому в центре поля зрения, равную $K_{1-4} = \gamma_{\Delta T} \cdot A_{1-4,\gamma} = 0{,}67 \cdot 0{,}3 = 0{,}2$ *мкм*. Это вполне допустимая величина. Здесь $A_{1-4,\gamma} = 0{,}3$ - коэффициент влияния.

Из-за непараллельности торцов в оправе четвертой линзы остальные заклонятся на угол

$$\gamma_{\Delta T} = \frac{\Delta_T}{100} = \frac{0{,}02}{100} = 0{,}67'.$$

Это приведет к появлению комы $K_{1-3} = 0{,}67 \cdot 0{,}8 = 0{,}54$ *мкм*, что также вполне приемлемо.

Из-за непараллельности торцов оправы со склейкой $\Delta_T = 0{,}02$ *мм* первая линза получит дополнительный разворот на 0,67′, что приведет к появлению комы $K_1 = 0{,}67 \cdot 3{,}0 = 2{,}01$ *мкм*. Это уже большая и поэтому недопустимая величина. От такого разворота первой линзы надо уходить.

Теперь рассмотрим влияние поперечных смещений линз в зазорах посадки $\phi 100 \dfrac{H7^{(+35)}}{\partial 6_{(-35)}}$.

В этом случае радиальный зазор может быть равен 35 мкм. И поперечные смещения линз в нем вызовут следующие значения комы:

$$K_4 = 35 \cdot 0{,}117 = 4{,}1 \text{ мкм};$$

$$K_{2-3} = 35 \cdot 0{,}071 = 2{,}48 \text{ мкм};$$

$$K_1 = 35 \cdot 0{,}088 = 3{,}08 \text{ мкм},$$

где вторые сомножители являются коэффициентами влияния.

Нетрудно увидеть, что это очень большие значения комы. Даже приточка оправ по корпусу до диаметрального зазора в 30 мкм не позволит радикально уменьшить кому децентрировок:

$$K_4 = 15 \cdot 0{,}117 = 1{,}75 \text{ мкм};$$

$$K_{2-3} = 15 \cdot 0{,}071 = 1{,}06 \text{ мкм};$$

$$K_1 = 15 \cdot 0{,}088 = 1{,}32 \text{ мкм}.$$

Как мы видим и в этом случае кома еще достаточно велика. А если учесть влияние собственных децентрировок семи поверхностей, то суммарная кома увеличится еще больше.

Таким образом, конструктивное решение базировки первых четырех линз не самое лучшее и следует подумать о другом решении.

Обратимся к первой линзе. Поскольку ее поперечное перемещение вызывает недопустимую кому, перейдем к конструктивному решению, которое вместо поперечного перемещения вызовет разворот линзы в том же поперечном зазоре. Такое решение представлено на рис.2.25. В этом случае угол разворота будет равен

$$\gamma_{Z1} = \frac{0{,}015}{161} = 0{,}3',$$

где 161 мм – расстояние от центра кривизны второй поверхности первой линзы до переднего опорного торца прокладного кольца между первой и

второй линзами. Этот разворот вызовет кому $K = 0{,}3' \cdot 0{,}9 = 0{,}27$ *мкм*, которая по сравнению с предыдущим вариантом в 4,9 раз меньше. Кома такой величины нас вполне устроит.

Теперь перейдем к анализу положения 2, 3 и 4 линз. Поскольку поперечные смещения склейки и четвертой линзы вызывают большие значения комы, то здесь, как и в случае с первой линзой, перейдем от смещения линз в радиальных зазорах к их разворотам в тех же зазорах. Рассмотрим два варианта крепления. Первый вариант представлен на рис.2.26, а второй на рис.2.27.

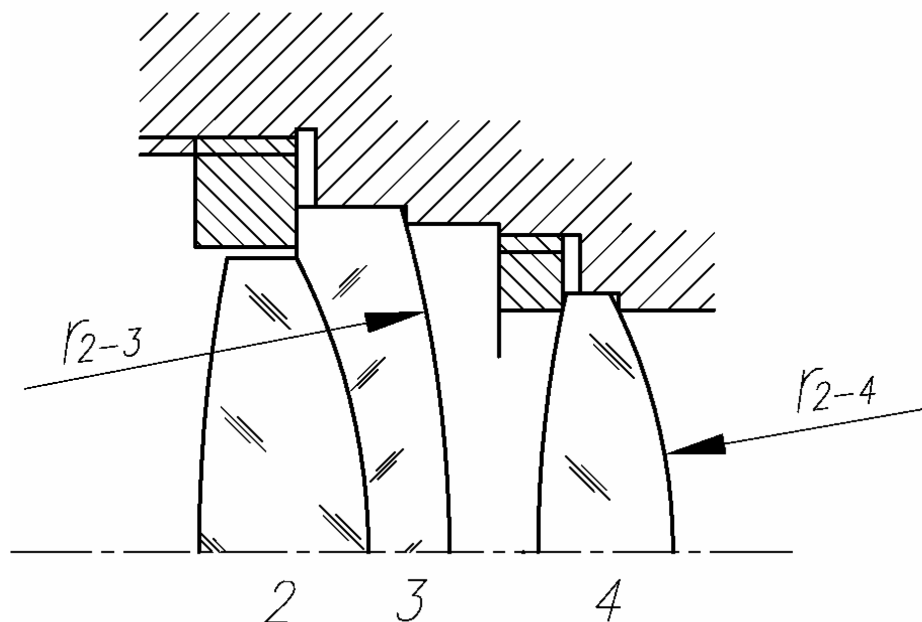


Рис. 2.26. Первый вариант крепления линз 2, 3 и 4

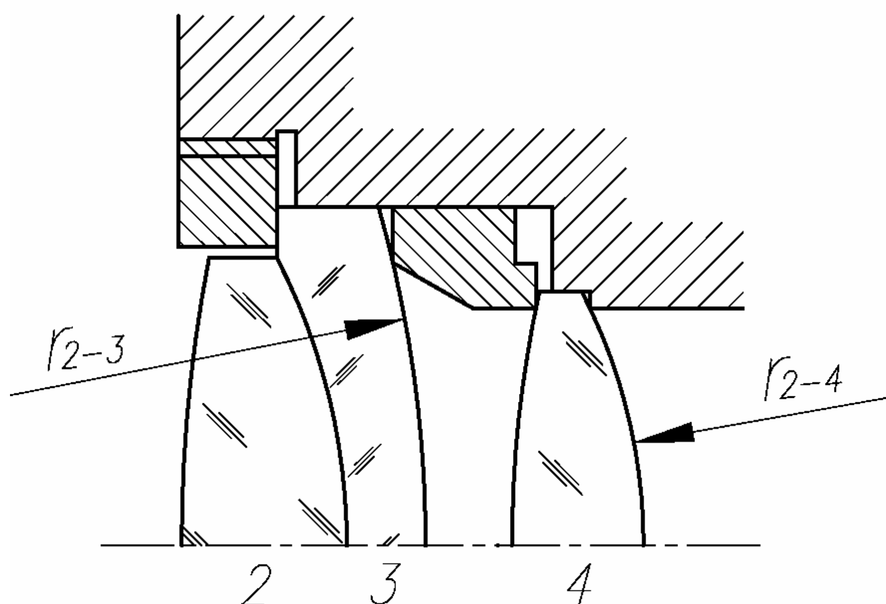


Рис. 2.27. Второй вариант крепления линз 2, 3 и 4

В первом варианте линзы крепятся раздельно, а во втором - через прокладное кольцо. Пусть места под линзы приточены с радиальными зазорами $Z_{2+3} = Z_4 = 0{,}015$ *мм*. Рассчитаем углы разворота и кому для первого случая.

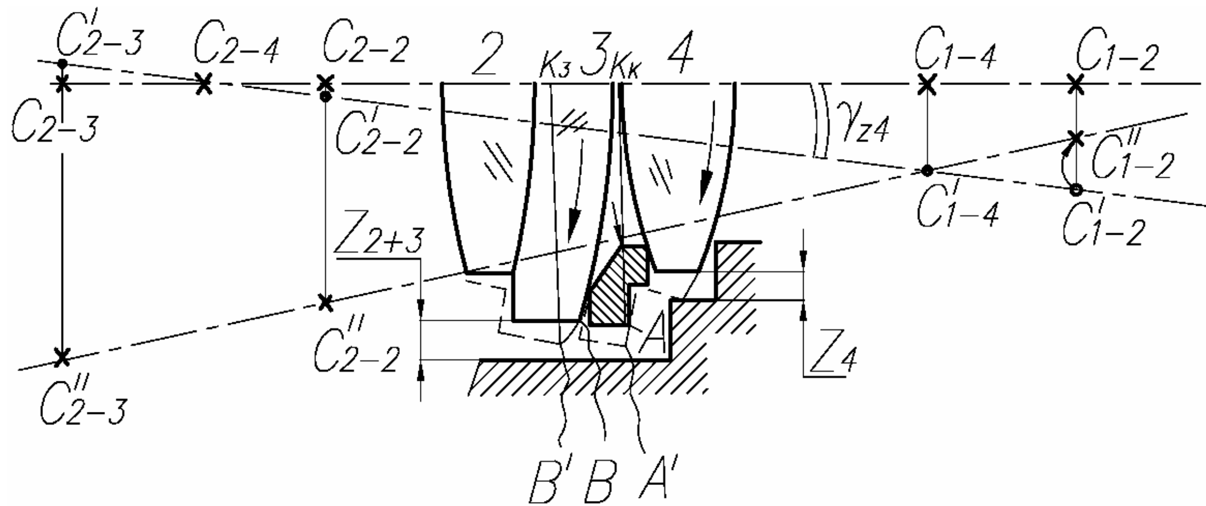


Рис. 2.28. Схема для расчета децентрировок

$$\gamma_{Z2+3} = \frac{0{,}015}{124} = 0{,}4';$$

$$\gamma_{Z4} = \frac{0{,}015}{140} = 0{,}3'.$$

$$K_{2+3} = 0{,}4 \cdot 1{,}45 = 0{,}58 \text{ мкм};$$

$$K_4 = 0{,}3 \cdot 5{,}8 = 1{,}75 \text{ мкм}.$$

Из приведенных расчетов следует, что если разворот склейки вызывает допустимую величину комы, то кома от разворота четвертой линзы довольно велика.

Приведем расчет комы для второго варианта.

Разворот четвертой линзы вокруг центра кривизны C_{2-4} ее опорной поверхности, а вместе с ней второй и третьей линз в зазоре $Z_4 = 0{,}015$ *мм*, произойдет на угол

$$\gamma_{Z4} = \frac{0{,}015}{140} = 0{,}00011 \text{рад} = 0{,}3'.$$

Для дальнейших расчетов нам потребуются знания радиусов и оптических толщин приведенных ниже:

$$r_{1-2} = 1630\ мм;$$

$$d_2 = 21{,}1\ мм;$$

$$r_{2-2} = -55\ мм = -r_{1-3}$$

$$r_{2-3} = -125\ мм;$$

$$d_3 = 3\ мм;$$

$$d_{3-4} = 0{,}1\ мм;$$

$$r_{1-4} = 320\ мм;$$

$$r_{2-4} = -140\ мм.$$

При развороте четвертой линзы точка A прокладного кольца сместится вниз на величину $C_{2-4}K_K \cdot \gamma_{Z4} = 100 \cdot 0{,}00011 = 0{,}011\ мм$. В оставшемся зазоре $0{,}015 - 0{,}011 = 0{,}004\ мм$ кольцо и опирающаяся на него склейка получат дополнительный разворот, но уже вокруг центра кривизны C_{1-4} первой поверхности четвертой линзы, к которой кольцо поджимается:

$$\gamma_{ZK} = \frac{0{,}004}{320} = 0{,}0000125 = 0{,}04'.$$

А ребро B склейки после разворота на угол γ_{Z4} займет положение B', сместившись на величину $C_{2-4}K_3 \cdot \gamma_{Z4} \approx 0{,}01\ мм$, а после разворота на угол γ_{Z4} вокруг C_{1-4} практически упрется в корпус компонента.

Рассчитаем смещение центров кривизны и кому децентрировки

$$\Delta C_{1-2} = -(C_{2-4}C_{1-2}) \cdot \gamma_{Z4} + C'_{1-4}C'_{1-2} \cdot \gamma_{ZK} = -1734{,}3 \cdot 0{,}00011 + 1603{,}8 \cdot 0{,}0000125 =$$

$$= -0{,}19 + 0{,}02 = -0{,}17\ мм;$$

$$\Delta C_{2-2} = -(C_{2-4}C_{2-2}) \cdot \gamma_{Z4} + C'_{1-4}C'_{2-2} \cdot \gamma_{ZK} = -72{,}4 \cdot 0{,}00011 - 262 \cdot 0{,}0000125 =$$

$$= -0{,}008 - 0{,}0033 = -0{,}011\ мм;$$

$$\Delta C_{2-3} = -(C_{2-4}C_{2-3}) \cdot \gamma_{Z4} + C'_{1-4}C'_{2-3} \cdot \gamma_{ZK} = 5{,}5 \cdot 0{,}00011 - 445 \cdot 0{,}0000125 =$$

$$= -0{,}0006 - 0{,}0055 = -0{,}005\ мм;$$

$$\Delta C_{1-4} = -(C_{2-4}C_{1-4}) \cdot \gamma_{Z4} = -450{,}5 \cdot 0{,}00011 = -0{,}05\ мм.$$

Из таблиц влияния децентрировок на кому в центре поля зрения находим коэффициенты влияния:

$$A_{1-2} = -0{,}0005;$$

$$A_{2-2} = -0{,}068;$$

$$A_{2-3} = -0{,}0025;$$

$$A_{1-4} = 0{,}051;$$

$$A_{2-4} = 0{,}066.$$

Теперь нетрудно определить суммарную кому децентрировок от разворотов склейки и четвертой линзы в своих зазорах:

$$K_\Sigma = -0{,}0005 \cdot (-17) - 0{,}068 \cdot (-0{,}011) - 0{,}0025 \cdot (-0{,}005) + 0{,}051 \cdot (-0{,}05) = 0{,}000085 + 0{,}00075 +$$

$$+ 0{,}0000125 - 0{,}00255 = -0{,}017\ мм \approx -1{,}7\ мкм.$$

За счет непараллельности торцов прокладного кольца склейка получит дополнительный разворот на угол

$$\gamma_{\Delta TK} = \frac{\Delta_{TK}}{\phi_K} = \frac{0{,}02}{100} = 0{,}67',$$

что вызовет дополнительную кому, равную $K_{\Delta T} = 1{,}5 \cdot 0{,}67' = 1$ *мкм*.

Сравнивая два варианта крепления склейки и четвертой линзы, следует отметить, что они достаточно близки друг к другу по влиянию на кому децентрировки в центре поля зрения и окончательный выбор варианта будет зависеть от уровня технологии изготовления оправ на данном предприятии.

Итак, мы рассмотрели общий подход к проектированию первого компонента на примере телевизионного объектива «Вариогоир-47». Проведенный анализ позволяет однозначно сказать, что требования к точности расположения линз первого компонента очень жесткие. А это, в свою очередь, означает, что точность изготовления корпусной детали первого компонента должна быть высокой.

На практике это достигается тем, что все посадочные места под линзы первого компонента точатся с одной установки. При этом корпусная деталь крепится на станке по тем поверхностям, по которым она базируется в корпусе объектива. А поскольку, чаще всего, такая базировка осуществляется по окулярной, многозаходной резьбе, то и на станке она должна крепиться по этой самой резьбе. Далее, зазор в резьбовом соединении корпус первого компонента – корпус объектива не должен превышать 0,02 мм. А так как такого точного соединения на отечественных станках не получить, необходимо предусмотреть притирку вышеуказанных двух деталей. При такой технологии изготовления появляется возможность получать самую высокую параллельность всех опорных торцов корпуса и соосность всех его посадочных диаметров под линзы, где-то до 2-5 мкм.

После того, как подобным образом будут спроектированы все компоненты объектива, производят окончательный расчет, связанный с определением дисперсии комы децентрировки по методикам, рассмотренным нами в книге [30].

2.4.10. Конструкция четвертого компонента («собственно» объектива)

В том случае, когда компонент состоит из одной линзы или склейки, а в особо сложных объективах, из комбинации склеек и простых линз, их крепление мало отличается от крепления линз в переходных оправах подвижных компонентов (см. выше). Когда же четвертый компонент представляет собой «собственно» объектив, то при его проектировании необходимо учитывать способ сборки, особенности метода юстировки на контрольно-юстировочных приборах цеха и возможность продольных

юстировочных подвижек в корпусе объектива при выставке рабочего отрезка и дистанционной шкалы.

В отечественной промышленности для сборки «собственно» объектива чаще всего используют такой способ насыпки, при котором в корпусную деталь засыпаются линзы, закрепленные и отцентрированные каждая в своей оправке. Такой способ позволяет в процессе сборки проводить подцентрировку «собственно» объектива перемещением или вращением наиболее чувствительного линзового элемента до положения, когда его собственная децентрировка полностью или частично компенсирует децентрировку остальных оптических элементов.

Для продольных юстировочных подвижек «собственно» объектива должна быть предусмотрена возможность его перемещения в корпусе объектива. С этой целью чаще всего на корпусной детали «собственно» объектива нарезают резьбу или оставляют радиальную канавку, в которую через корпус объектива при юстировке устанавливают инструмент для подвижки объектива. Возможны и другие способы перемещения.

3. Разработка методики юстировки сдвига плоскости изображения

При разработке методики сборки и юстировки объективов переменного фокусного расстояния (ОПФР), в первую очередь должна быть решена задача достижения минимального смещения плоскости изображения во всем диапазоне изменения фокусного расстояния и во вторую очередь должна быть обеспечена такая степень центрировки оптических элементов, которая в полной мере гарантировала бы необходимое качество изображения для всех значений фокусного расстояния.

Рассмотрим решение первой задачи на примере объективов с механической компенсацией сдвига плоскости изображения, получивших в настоящее время преимущественное распространение.

Большая часть современных ОПФР с механической компенсацией, как мы отмечали ранее, строится по четырехкомпонентной кинематической схеме, в которой при изменении фокусного расстояния перемещаются два компонента: один – по линейной зависимости, другой - по нелинейной. Из двух других первый, дистанционный, служит для фокусировки объектива на снимаемый объект, четвертый, в основном, для коррекции остаточных аберраций и установки заданной величины рабочего отрезка объектива (рис.3.1).

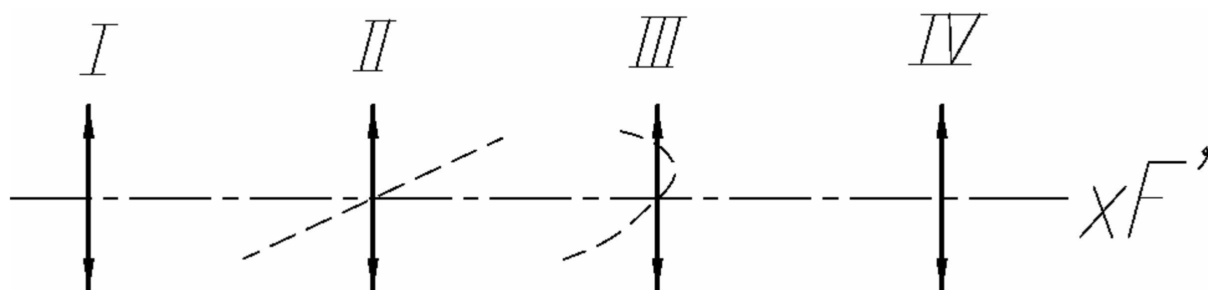


Рис. 3.1. Принципиальная оптическая схема ОПФР с механической компенсацией

Обычно процесс сборки объектива и большая часть его юстировочных операций происходит при конкретном значении фокусного расстояния, называемым контрольным фокусным расстоянием. Значения воздушных промежутков, соответствующих этому фокусному расстоянию, называют контрольными и обозначают d_1^o, d_2^o, d_3^o, d_4^o и т.д. Точки профиля паза, где должны устанавливаться оси винтов подвижных компонентов в соответствии с выбранным значением контрольного фокусного расстояния будем по аналогии называть контрольными точками паза. Выбор контрольного значения фокусного расстояния определяется в процессе разработки методики юстировки объектива, о чем будет рассказано несколько позже. Но, как правило, это такое значение, при котором имеет место наиболее сильное влияние погрешностей положения и установки

компонентов на смещение плоскости изображения. При выборе контрольного значения фокусного расстояния обязательно учитывается угол подъема μ паза кулачка в контрольной точке (рис.3.2).

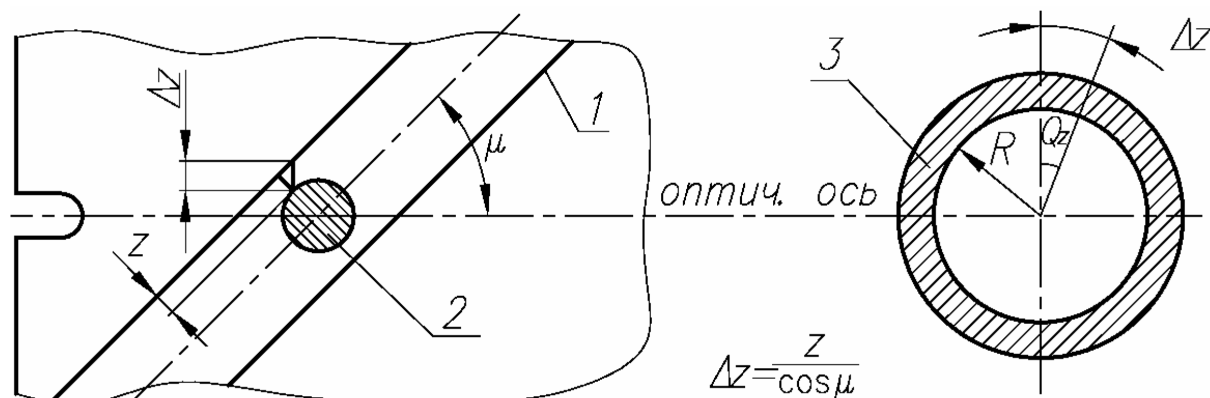


Рис. 3.2. Влияние зазора z на разворот кулачка: 1 – паз кулачка, 2 – винт, 3 – кулачок

Чем меньше этот угол, тем слабее влияние зазора z между винтом и стенками паза на дополнительный разворот кулачка $Q_Z = \frac{\Delta_Z}{R}$, приводящий к смещению расчетной точки паза относительно оси винта. К сожалению, не всегда удается получить нужную величину угла подъема μ. И в тех случаях, когда это не удается, приходится отказываться от чисто винтового паза и переходить к его локальным искривлениям за счет выпрямления (уменьшения μ) криволинейного паза. И, наконец, оптический компонент, от которого устанавливаются все другие компоненты объектива, будем называть базовым.

При разработке оптимальной для конкретной кинематической схемы объектива варианта сборки и юстировки очень важно определить последовательность установки оптических компонентов в корпусе объектива, технологические погрешности изготовления, вызывающие отклонения оптических компонентов от расчетных положений и способы компенсаций этих отклонений.

3.1. Выбор последовательности юстировки подвижных компонентов

Конечно, при проектировании объектива всегда стремятся к созданию такой конструкции, которая позволяла бы проводить сборку объектива без дополнительной юстировки. К сожалению, из-за погрешностей изготовления и расположения пазов, неточности установки осей винтов подвижных компонентов в контрольные точки пазов кулачка, недопустимых смещений осей винтов относительно оптики подвижных компонентов, погрешностей выставки контрольных воздушных промежутков и т.д. это не всегда удается.

Рассмотрим влияние перечисленных погрешностей на выбор последовательности юстировки положений подвижных компонентов.

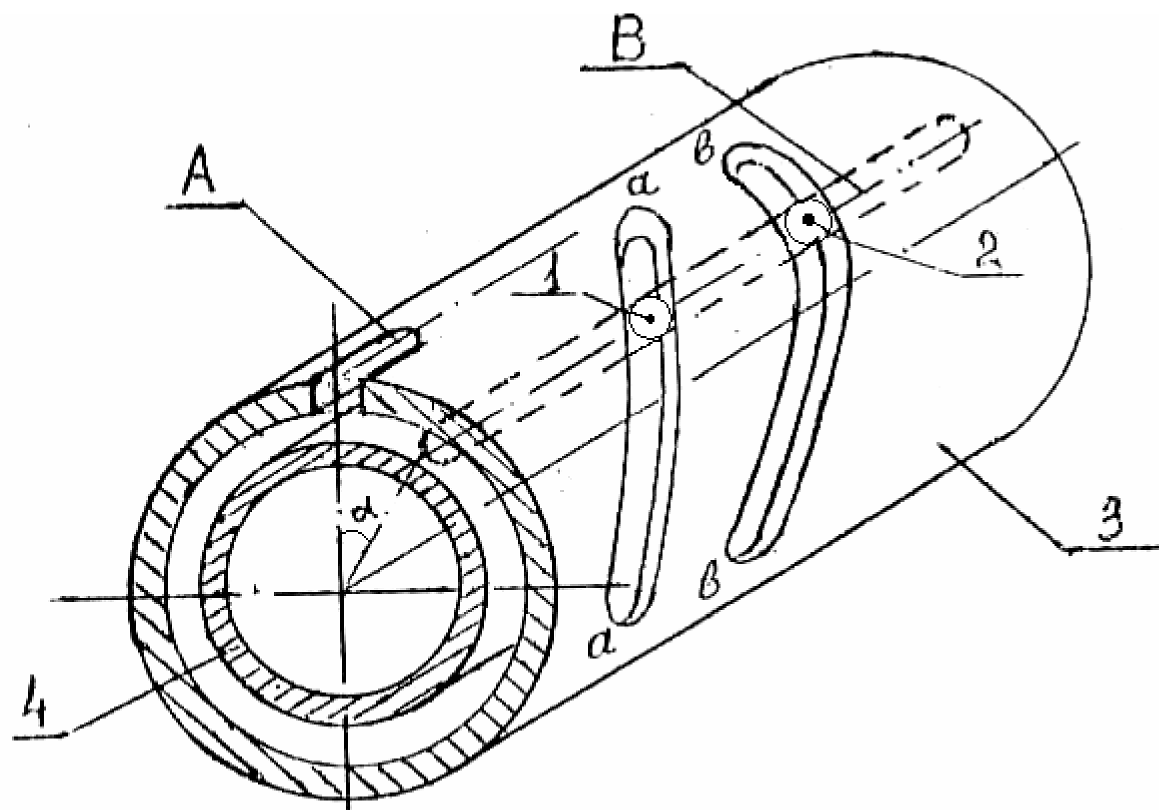


Рис. 3.3. Схема расположения винтов в пазах кулачка и корпуса объектива

На рис.3.3 представлен узел кулачка 3 с базовым пазом *A*, относительно которого нарезаются винтовой «а-а» и криволинейный «в-в» пазы, и корпуса объектива 4 с осевым пазом *B*. На пересечениях винтового и криволинейного пазов с осевым устанавливаются оси винтов 1 и 2 подвижных компонентов II и III.

На рис.3.4 схематично представлены подвижные компоненты и траектории, по которым они перемещаются. В идеальном случае, когда механизмы объектива изготавливаются без погрешностей, оси винтов подвижных компонентов при сборке точно устанавливаются в контрольные точки пазов «а-а» и «в-в». При этом воздушный промежуток

между компонентами соответствует его контрольному значению d^o_{2-3} (рис.3.4).

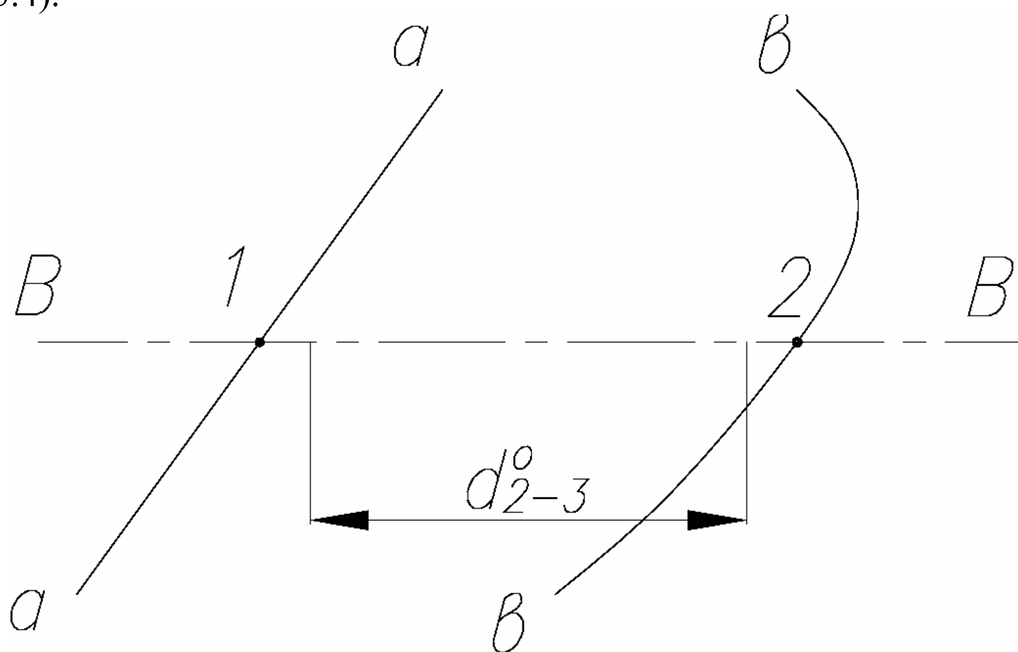


Рис. 3.4. Траектории перемещения винтов 1 и 2

Рассмотрим случай, когда из-за погрешностей изготовления весь винтовой паз сместится относительно оси базового паза А на угол $\Delta\alpha$, а криволинейный останется в расчетном положении (рис.3.5).

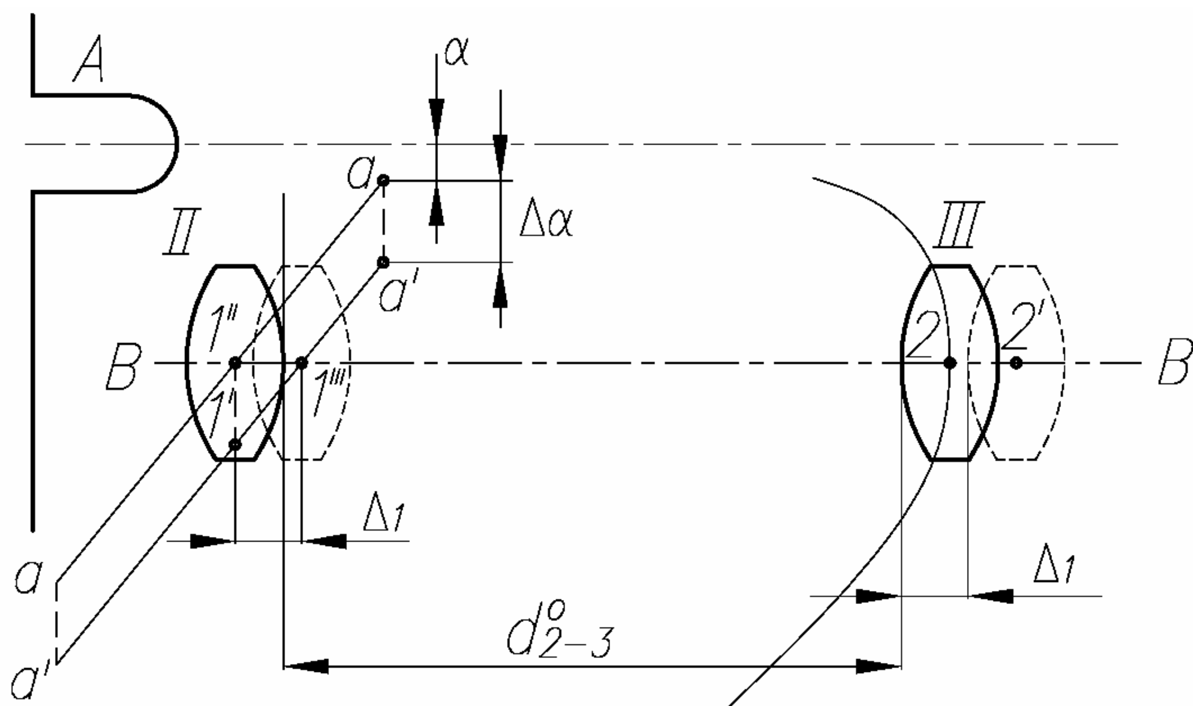


Рис. 3.5. Схема перемещения компонентов при смещении винтового паза на $\Delta\alpha$

Очевидно, ось винта в криволинейном пазу будет находиться в расчетной точке 2, а оптика III-го компонента займет расчетное положение (сплошная линия). Что касается II-го компонента, то из-за разворота паза «а-а» на $\Delta\alpha$ расчетная точка 1 займет новое положение 1', а на ось В-В паза корпуса в положение 1''' установится точка 1'', смещенная относительно расчетного положения на величину Δ_1. Вместе с винтом новое положение займет оптика II-го компонента (штриховая линия).

Если базовым компонентом является III компонент, то контрольный промежуток d_{2-3}^o должен выставляться осевыми подвижками оптики второго компонента.

В этом случае оптика II-го компонента должна быть смещена из своего нового положения (штриховая линия) влево на величину Δ_1 и занять расчетное положение (сплошная линия). Таким образом, в отъюстированном состоянии ось II-го компонента находится в пазу, смещенном вдоль объектива на величину Δ_1, а его оптика – в расчетном положении. Нетрудно видеть, что при вращении кулачка ось II-го компонента будет перемещаться по смещенному пазу а'-а', каждая точка которого отстоит от соответствующей точки расчетного паза а-а на неизменную величину Δ_1, вследствие чего оптика II-го компонента будет перемещаться по теоретической траектории и закон изменения воздушного промежутка d_{2-3} не нарушится.

Если базовым компонентом является II, то контрольный промежуток d_{2-3}^o будет устанавливаться осевыми подвижками оптики III-го компонента. В этом случае оптика III-го компонента сместится вправо от расчетного положения на величину Δ_1. А так как ось винта III-го компонента находится в контрольной точке криволинейного паза, занимающего расчетное положение, то перемещение оптики III-го компонента, как это следует из вышеприведенных рассуждений, будет также происходить по теоретическому закону и, следовательно, закон изменения промежутка d_{2-3} не будет нарушен.

Рассмотрим случай, когда из-за погрешностей изготовления криволинейный паз сместится относительно базового паза *А* на величину $\Delta\alpha$, а винтовой паз и оптика II-го компонента будут находиться строго в расчетном положении (рис.3.6).

Ясно, что контрольная точка 2 криволинейного паза займет новое положение 2', а ось винта установится в положение 2''', смещенного относительно расчетного на величину Δ_1. Допустим, что базовым компонентом является второй. В этом случае установка контрольного воздушного промежутка d_{2-3}^o будет производиться осевыми подвижками оптики третьего компонента. Нетрудно видеть, что оптика третьего компонента должна быть смещена из нового положения вправо на

Рис. 3.6. Схема перемещения компонентов при смещении криволинейного паза на $\Delta\alpha$

величину Δ_2 и этим самым занять положение, соответствующее положению оси винта в точке 2. Но из-за смещения всего паза на $\Delta\alpha$ это положение оптики будет соответствовать положению винта в точке 2''', сдвинутого вдоль оси на Δ_2 от расчетного положения точки 2. Предположим, что второй компонент переместился в положение 1^{IV}. Новому положению оси винта второго компонента должен соответствовать другой расчетный промежуток между вторым и третьим компонентами - d_{2-3}^{IV}. Но так как ось винта третьего компонента в действительности займет положение 2^{IV}, сдвинутое относительно расчетного на Δ_2', то и воздушный промежуток будет отличаться на ту же самую величину.

Таким образом, при вращении кулачка ось винта третьего компонента будет двигаться по смещенному пазу в'-в', а оптика третьего компонента перемещается не по теоретической кривой, а по траектории, которая не совпадает с расчетной на переменные величины, отмеченные на рис.3.6 горизонтальной штриховкой. Следовательно, закон изменения d_{2-3} будет нарушен.

Если мы допустим, что базовым будет являться третий компонент, то в этом случае установку контрольного промежутка d^o_{2-3} должны производить осевыми подвижками оптики второго компонента (рис.3.7).

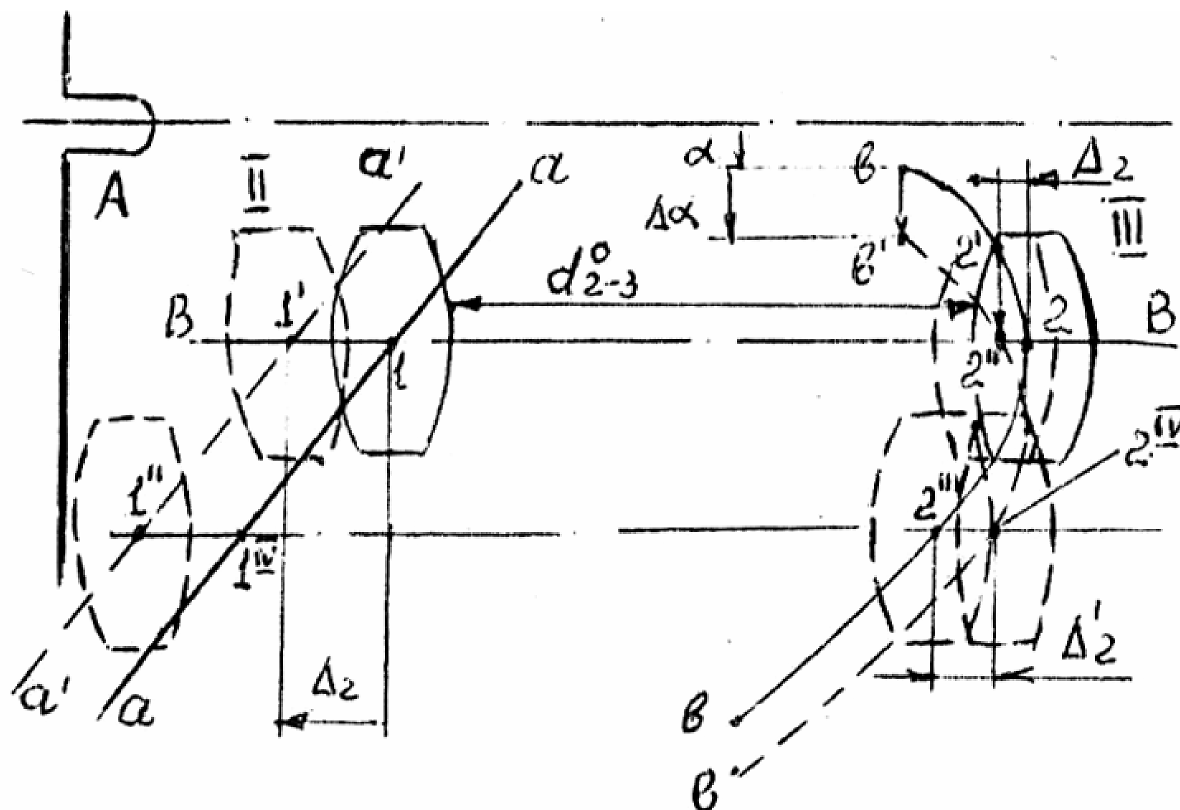


Рис. 3.7. Схема установки d^o_{2-3} при базовом III компоненте

Очевидно, при установке d^o_{2-3} оптика второго компонента будет смещена влево от расчетного положения на величину Δ_2. При вращении кулачка ось первого винта второго компонента будет перемещаться по теоретическому профилю а-а, а его оптика – по параллельной траектории а'-а', соответствующей теоретическому закону перемещения, но сдвинутой на величину Δ_2. При этом ось винта третьего компонента и его оптика будут перемещаться по сдвинутому пазу в'-в'. Пусть ось винта третьего компонента переместилась в точку 1^{IV}. Тогда ось винта третьего компонента займет положение 2^{IV}, сдвинутое относительно теоретического положения 2''' на величину $\Delta'_2 \neq \Delta_2$. А так как погрешность положения Δ'_2 третьего компонента будет величиной переменной, то компенсировать ее постоянной по величине юстировочной подвижкой оптики второго компонента невозможно.

Все сказанное выше справедливо для случая, когда ось В-В продольного паза корпуса объектива проходит через контрольные точки пазов кулачка, определяемые углом α относительно базового паза *A*. Рассмотрим случай, когда контрольные точки не совпадают с осью В-В продольного паза корпуса объектива. Такой случай может иметь место, например, при

дополнительном развороте кулачка на величину $\Delta\alpha$, возникающем при сборке объектива (рис.3.8). В результате на ось паза корпуса установятся не теоретические точка 1 винтового паза и точка 2 криволинейного, а другие точки этих пазов 1' и 2' (положение 1'' и 2'').

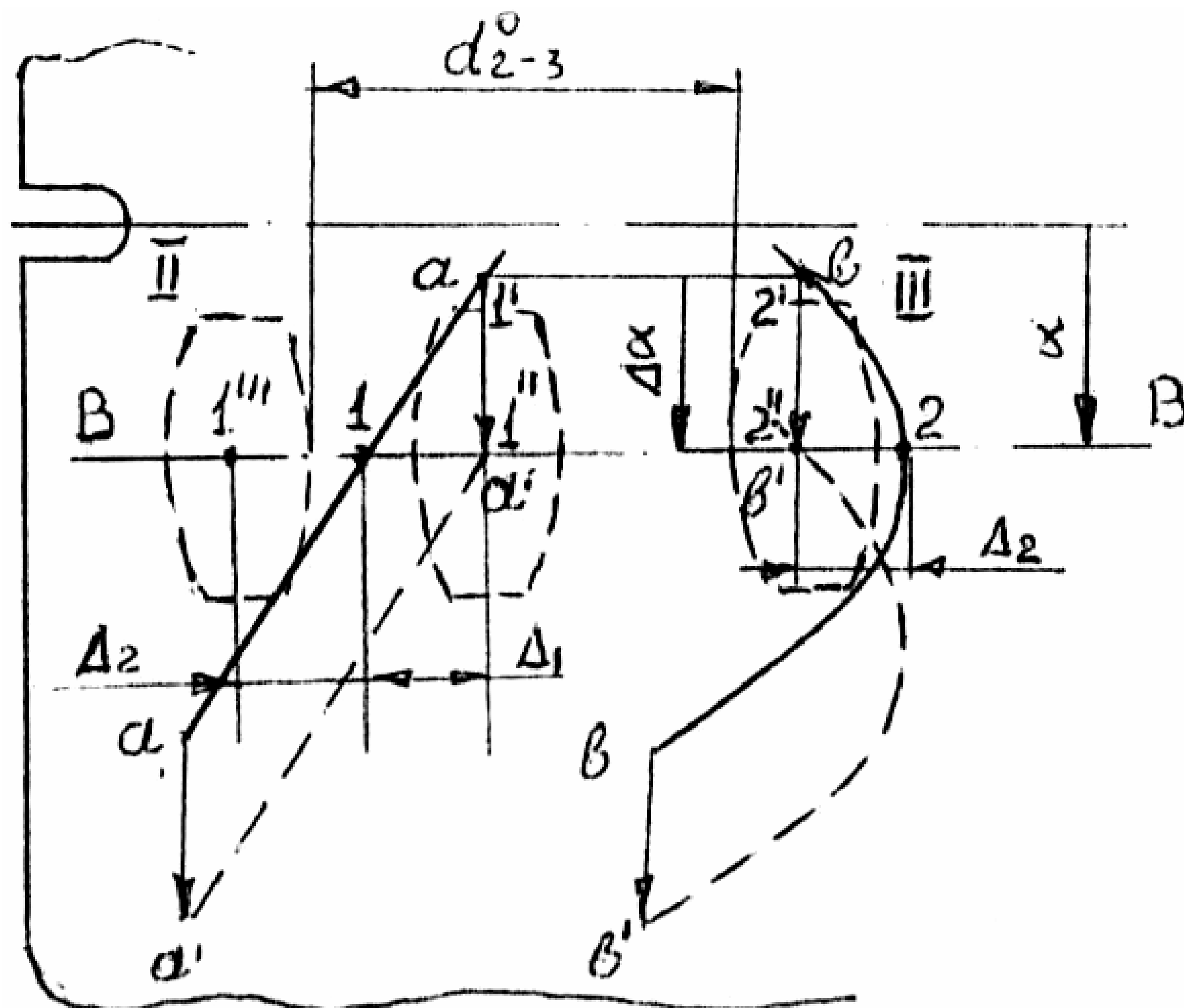


Рис. 3.8. Схема юстировки при несовпадении оси В-В с контрольными точками пазов

Рассмотрим, что произойдет при юстировке, если третий компонент является базовым.

В этом случае при установке контрольного промежутка d^o_{2-3} подвижкой второго компонента, его оптика должна быть смещена из положения 1'' в положение 1''' на величину $\Delta_2 + \Delta_1$, или на величину Δ_2 относительно расчетного положения 1. Тогда, при вращении кулачка ось винта второго компонента будет перемещаться по винтовому пазу, смещенному вдоль оси объектива относительно расчетной траектории на постоянную величину Δ_1, вследствие чего закон перемещения оптики второго компонента не будет отличаться от расчетного. Что касается третьего

компонента, то осевая величина смещения каждой точки профиля паза относительно теоретической траектории не будет постоянной величиной, а будет меняться как по величине, так и по знаку. Вследствие чего закон перемещения оптики третьего компонента, а значит и закон изменения воздушного промежутка d_{2-3} будут иметь характер, отличный от расчетного.

Нетрудно представить, что произойдет, когда базовым станет второй компонент. В этом случае при установке контрольного промежутка d_{2-3}^o, оптика второго и третьего компонентов будет смещена относительно своего теоретического положения на величину Δ_1. При вращении кулачка второго компонента будет перемещаться по профилю, сдвинутому относительно расчетного на постоянную величину Δ_1. Поэтому закон его перемещения не изменится. При перемещении второго винта третьего компонента по смещенному на Δ_1 профилю, положение его оптики относительно теоретического не будет постоянным. Вследствие этого исходный закон изменения промежутка d_{2-3} нарушится.

Выводы:

1. Возникающее при изготовлении и сборке смещение винтового паза параллельно самому себе как поперек, так и вдоль оси объектива, после установки контрольного воздушного промежутка не влияет на закон изменения воздушного промежутка между подвижными компонентами.
2. Параллельное смещение криволинейного паза поперек оси объектива относительно расчетного положения не может быть скомпенсировано в процессе юстировки переменного воздушного промежутка. Поэтому требования к его точности расположения должны быть выше, чем к винтовому пазу. И, следовательно, в качестве базового всегда необходимо выбирать третий компонент.

3.2. Способы установки винтов подвижных компонентов в контрольные точки пазов кулачка

Для правильной выставки переменных воздушных промежутков, необходимо в конструкцию объектива закладывать возможность установки оси винтов подвижных компонентов в расчетные положения, которые мы назвали контрольными точками. Делается это различными способами. Рассмотрим некоторые из них.

Для объективов, в которых погрешности выставки переменных воздушных промежутков слабо влияют на смещение плоскости изображения, оси винтов устанавливают в контрольные точки пазов кулачка по рискам А и Б (рис.3.9), нанесенных на его цилиндрической поверхности напротив контрольных точек. Контроль положения относительно этих рисок осуществляется визуально. После чего устанавливается контрольное значение воздушного промежутка d^o_{2-3}. Из-за невысокой точности этого способа, широкого распространения в промышленности он не получил.

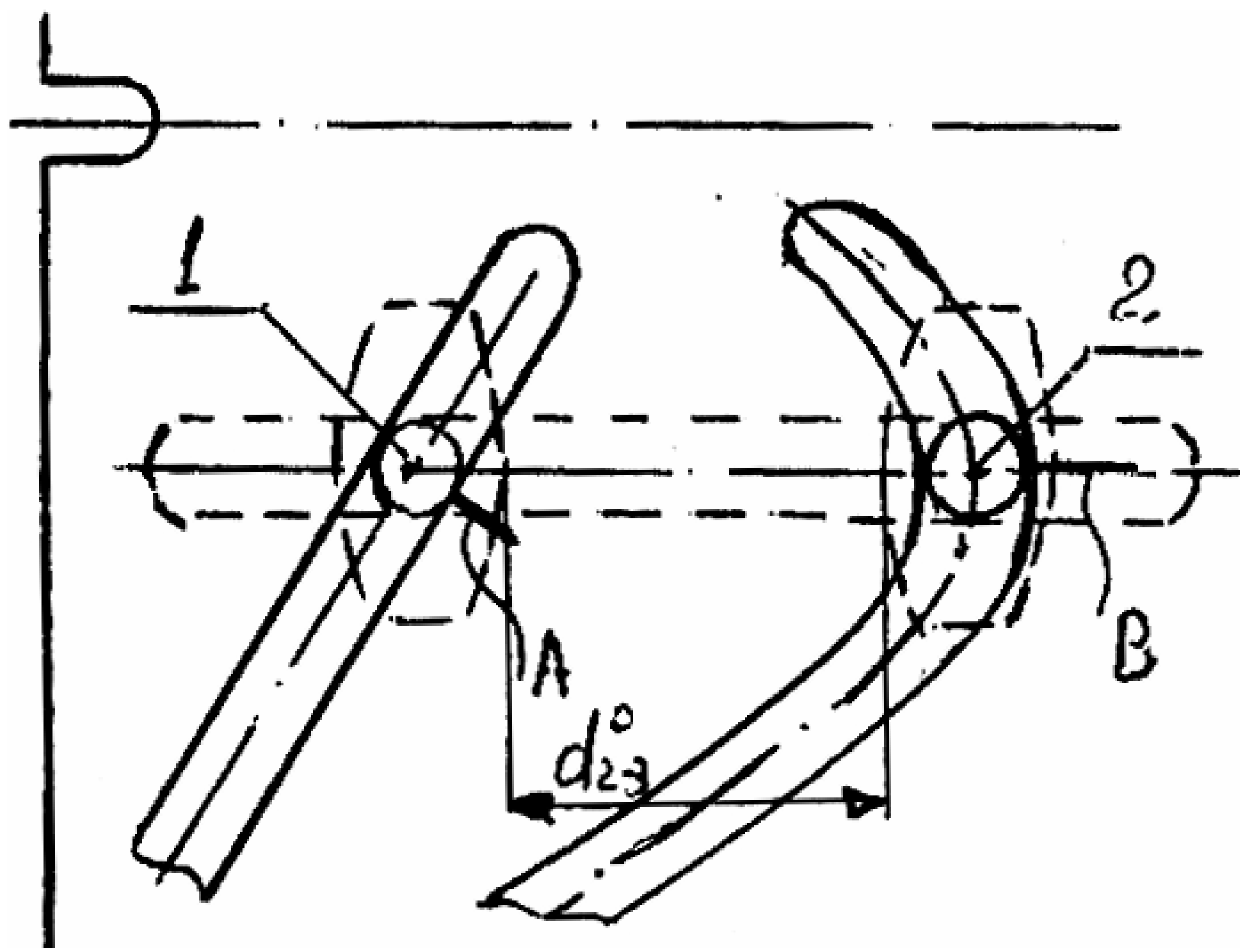


Рис. 3.9. Выставка винтов по рискам А и В

При достаточно точном изготовлении пазов кулачка, часто применяют так называемые «аппендиксы», которые представляют собой небольшие дополнительные удлинения пазов, параллельные базовому торцу кулачка, начиная от контрольной точки (рис.3.10).

Рис. 3.10. Выставка винта 2 в “аппендиксе”

Такое удлинение криволинейного паза, обозначенное на рис.3.10 буквой l обычно составляет в угловой мере не более 5°. Очевидно, перемещение винта третьего компонента вдоль “аппендикса” не изменит величину контрольного воздушного промежутка d^o_{2-3}. Это свойство “аппендикса” явилось причиной его достаточно широкого распространения. Но при его использовании необходимо помнить, что “аппендиксы” должны изготавливать не для одного какого-то паза, а одновременно для винтового и криволинейного пазов. Объясняется это следующим. Пусть в процессе юстировки в кулачке с “аппендиксом” только для криволинейного паза (рис.3.10) оси винтов второго и третьего компонентов установлены в положение 1-1 в обоих пазах. После чего выставлен контрольный промежуток d^o_{2-3}. Вращением кулачка переместим оси винтов в положение 2-2, соответствующее контрольным точкам пазов 1 и 2. При таком смещении винтов третий компонент, как это следует из рис.3.10 не переместится вдоль оси объектива, а второй компонент сдвинется на величину Δ. Таким образом, при выходе винтов компонентов в рабочую зону (контрольные точки 1 и 2) контрольный воздушный промежуток будет отличаться от расчетного значения d^o_{2-3} на величину Δ, которая

может оказаться недопустимой. Такое изменение контрольного промежутка не произойдет, если “аппендиксы” изготовлены в двух пазах (рис.3.11).

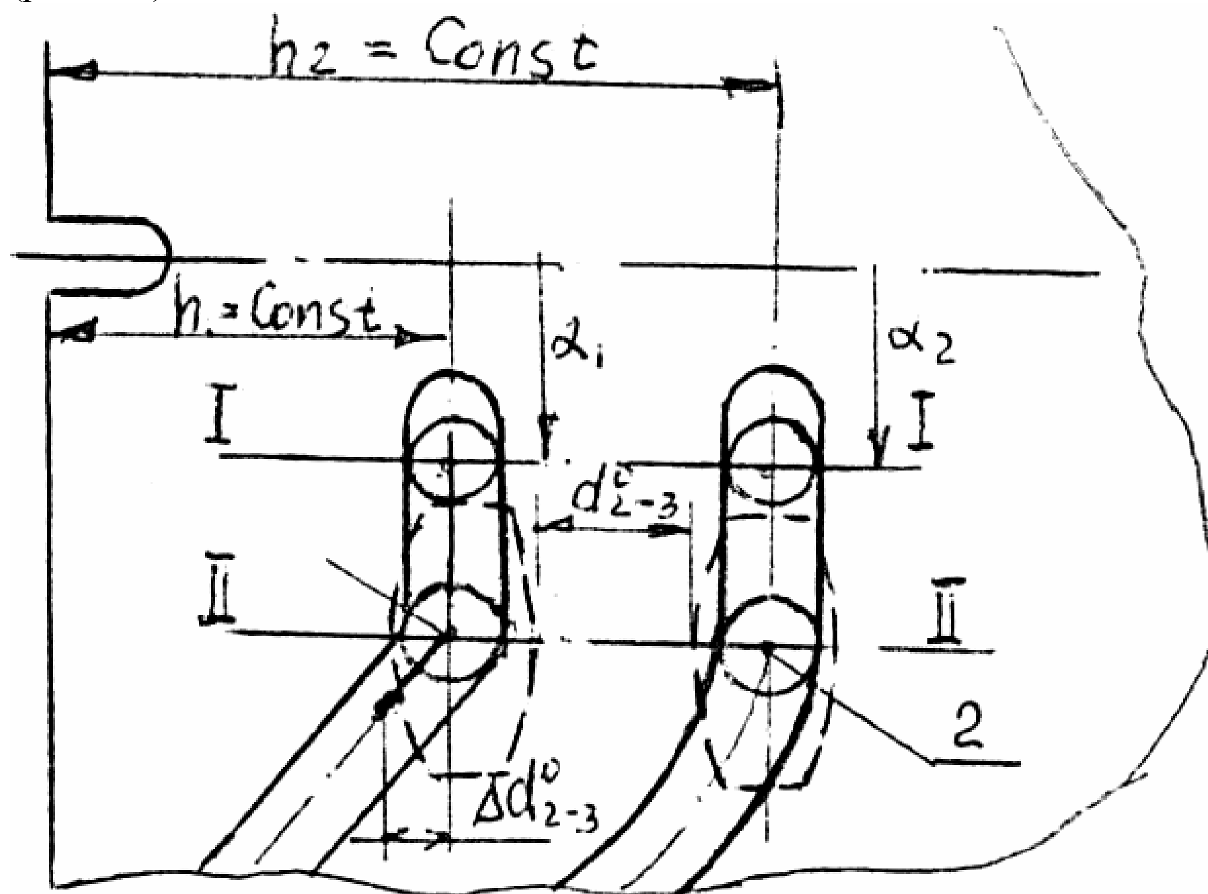


Рис. 3.11. Выставка винтов 1 и 2 в “аппендиксах”

В этом случае выход винтов в рабочую зону пазов будет происходить одновременно, что не вызовет изменения контрольного воздушного промежутка между подвижными компонентами.

А теперь рассмотрим влияние погрешностей расположения пазов на точность выставки контрольного воздушного промежутка между подвижными компонентами. Допустим, что пазы изготовлены с погрешностями, которые вызывают их смещение относительно базового торца кулачка соответственно на $\pm\Delta h_1$ и $\pm\Delta h_2$, и разворот относительно базового паза A на величины $\pm\Delta\alpha_1$ и $\pm\Delta\alpha_2$. Если отклонения пазов Δh_1 и Δh_2 достаточно легко компенсируются при выставке контрольного воздушного промежутка дополнительной юстировочной подвижкой оптики второго компонента на величину $(\Delta h_1 \pm \Delta h_2)$, то относительный разворот пазов, возникающий когда $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$ не равны как по величине, так и по направлению, приведет к тому, что один из винтов выйдет в рабочую зону раньше, чем другой на величину $R\cdot(\Delta\alpha_1 \pm \Delta\alpha_2)$. Здесь R - половина диаметра цилиндрического кулачка. При этом произойдет изменение контрольного воздушного промежутка на

$d^o_{2-3} = R \cdot (\Delta\alpha_1 \pm \Delta\alpha_2) \cdot tg\mu$, где μ - угол подъема паза кулачка относительно оси аппендикса.

В кинолюбительских объективах размеры кулачков обычно невелики. Пусть $R = 20$ *мм*; $\Delta\alpha_1 = \pm 3'$; $\Delta\alpha_2 = \pm 3'$; $\mu = 30°$, тогда

$d^o_{2-3} = 20 \cdot (9 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}) \cdot tg30° \approx 0{,}02$. Эта величина изменения контрольного воздушного промежутка может оказаться допустимой. Но для объективов с большими размерами кулачков (например, телевизионных с большими перепадами увеличений), эта величина может вырасти в 2-3 раза и уже окажется недопустимой.

В большинстве объективов винты подвижных компонентов перемещаются не в едином осевом пазу корпуса (рис.3.9), а каждый в своем (рис.3.12).

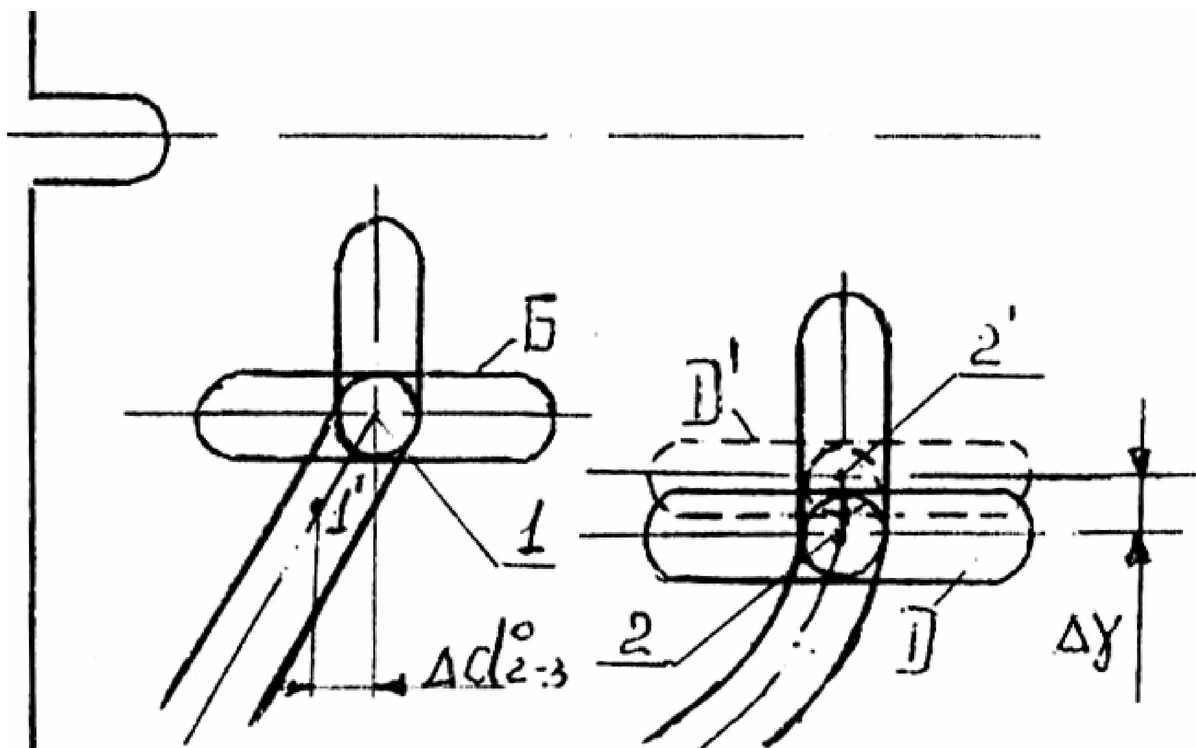


Рис. 3.12. Установка винтов 1 и 2 в двух осевых пазах Б и D

Из-за угловой погрешности $\Delta\gamma$ расположение одного осевого паза корпуса *Б* относительно другого *D* ось винта третьего компонента придет не в контрольную точку 2, а в отстоящую от нее на величину $\Delta\gamma \cdot R$ точку 2'. В тоже время ось винта второго компонента придет в свою контрольную точку 1. При дальнейшем вращении кулачка ось винта третьего компонента займет положение точки 2, а ось винта второго компонента переместится в точку 1', смещенную вдоль оси объектива на величину $\Delta d^o_{2-3} = R \cdot \Delta\gamma \cdot tg\mu$. Таким образом, при выходе в рабочую зону второй компонент будет опережать третий, а величина контрольного промежутка между подвижными компонентами нарушится.

Очевидно, все сказанное будет справедливо и для конструкции объектива, в которой продольное перемещение компонентов осуществляется не осевыми пазами корпуса, а направляющими пинолями. Как было отмечено выше, в конструкциях на пинолях на опережающее или отстающее движение компонентов сказывается ошибка расположения винта на подвижном компоненте (рис.3.13), что также приводит к отклонению d^{o}_{2-3} от расчетного значения на величину $\Delta d^{o}_{2-3} = R \cdot \Delta\beta \cdot tg\mu$.

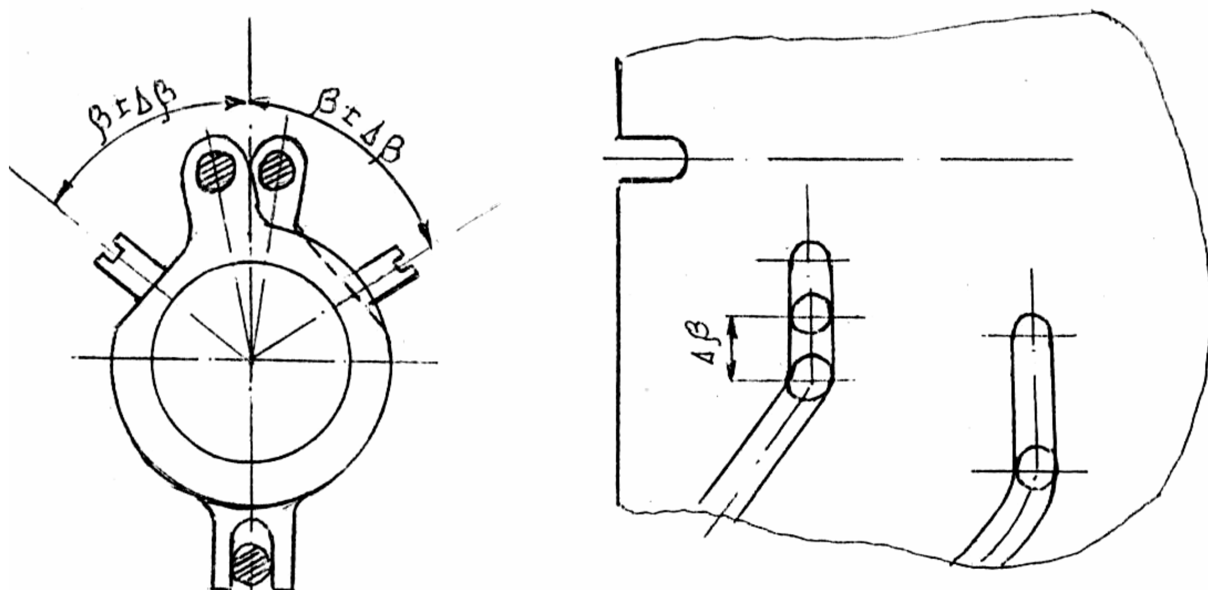


Рис. 3.13. Юстировка винтов при перемещении компонентов по пинолям

Рассмотрим способ задания контрольных точек в пазах кулачка без применения “аппендиксов” (рис.3.14).

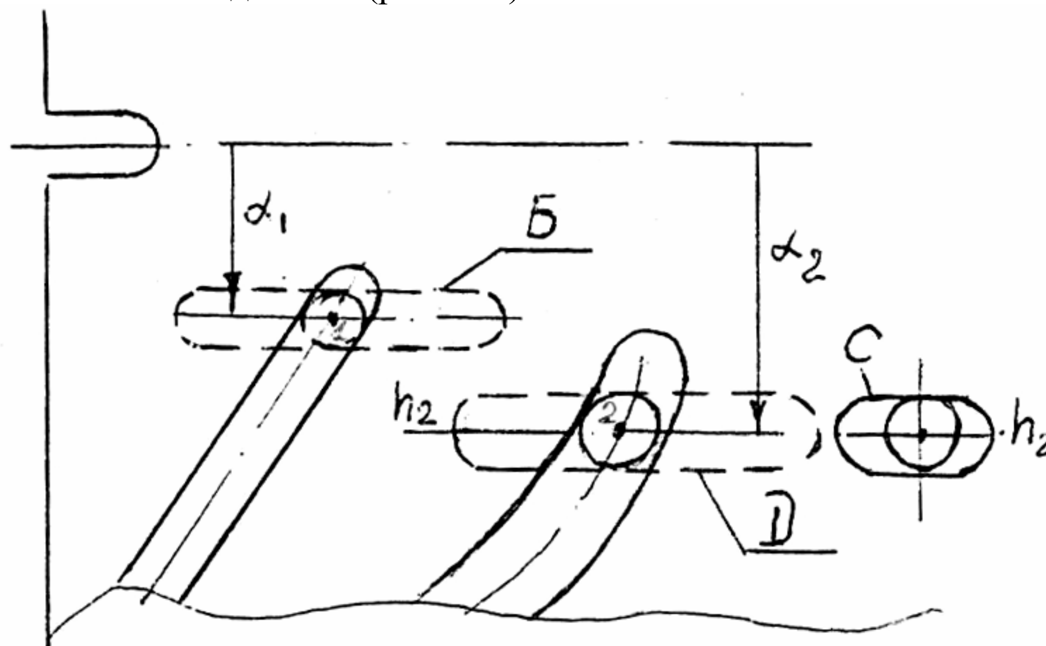


Рис. 3.14. Юстировка по контрольному пазу С

Суть его состоит в следующем. На образующей кулачка $h_2 - h_2$, проходящей через контрольную точку 2, рядом с криволинейным пазом, одновременно с его изготовлением фрезеруется отверстие или паз *С*, т.к. при фрезеровании отверстия возможно его разбиение. При проведении юстировки берется калибр с цилиндрической головкой, равной по диаметру ширине паза, и устанавливается насквозь через этот паз кулачка и осевой паз *D* корпуса объектива. Очевидно при этом ось продольного паза *D* корпуса объектива будет проходить через контрольную точку 2 криволинейного паза. А поскольку положение осевого паза *Б* корпуса объектива задается достаточно жестко относительно осевого паза *Д*, то при отсутствии недопустимых погрешностей изготовления этих пазов, ось паза *Б* также должна пройти через контрольную точку 1 винтового паза. Следовательно, оси винтов, установленные через эти пазы в подвижном компоненте, должны совпадать с контрольными точками.

Отметим некоторые особенности этого способа установки винтов. Самое важное в этом способе – добиться точного прохождения оси юстировочного паза *С* через контрольную точку 2. Понятно, что такое возможно только при их одновременном изготовлении. Если это сделать, то ошибки взаимного углового расположения винтового и криволинейного пазов $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$, ошибка $\Delta\gamma$ во взаимном расположении осевых пазов *Б* и *Д* не приведут к изменению контрольного воздушного промежутка между компонентами.

Несколько иначе проводится юстировка в объективах с пинолями. Поскольку необходимости в продольных составляющих пазах в этих объективах нет – их роль выполняют направляющие пиноли, то произойдет изменение юстировки. Через паз *С* вворачивают в компонент юстировочный винт. После чего известными способами закрепляют кулачок на корпусной детали таким образом, чтобы он был лишен возможности вращаться. Затем выворачивают юстировочный винт и, перемещая третий компонент вдоль пиноли, добиваются совмещения резьбового отверстия под винт с криволинейным пазом. После совмещения через криволинейный паз устанавливают рабочий винт, его ось должна совпасть с контрольной точкой криволинейного паза. Перемещая вдоль пиноли второй компонент, добиться совмещения его резьбового отверстия под винт с винтовым пазом. После крепления винта его ось также должна совпасть с контрольной точкой криволинейного паза. Но даже если из-за погрешностей изготовления они не совпадут, дополнительного изменения d_{2-3} не будет.

3.3. Технологические погрешности, вызывающие сдвиг плоскости изображения

После того как выявлено контрольное значение фокусного расстояния, соответствующие ему величины переменных воздушных промежутков, способ и последовательность установки подвижных компонентов, определяются оптические компоненты, которыми наиболее удобно и быстро можно проводить юстировку контрольных воздушных промежутков. Практика изготовления ОПРФ показала, что к таким компонентам, в первую очередь, следует отнести первый и последний компоненты, к которым имеется относительно легкий доступ. Второй и третий компоненты находятся глубоко внутри объектива, поэтому использование их для проведения юстировочных работ всегда непросто и чаще всего связано с разборкой всего объектива.

Как мы выяснили выше, при установке контрольных воздушных промежутков в качестве базового компонента следует брать третий компонент, закон перемещения которого определяется криволинейным пазом. Сборка объектива должна начинаться с установки оси винта третьего компонента в контрольную точку паза кулачка. При этом, за счет технологических погрешностей изготовления, может произойти смещение третьего компонента от расчетного положения:

- параллельное смещение профиля паза от расчетного положения вдоль оси цилиндрического кулачка - $\Delta_{\Pi h}$;
- параллельное смещение профиля паза по углу относительного базового паза кулачка - $\Delta_{\Pi\alpha}$;
- погрешность установки оси винта компонента в контрольную точку паза - Δy;
- погрешность положения оптического блока компонента относительно винта - Δ_{QB};
- местная ошибка профиля паза кулачка - Δh;
- смещение в зазоре между стенками паза и винтом - Δz;
- угловая ошибка взаимного расположения осевых направляющих - $\Delta\gamma$.

Обозначим суммарную погрешность положения третьего компонента через Δ_3 (рис.3.15).

На следующем этапе сборки устанавливают четвертый и второй компоненты, выдерживая при этом соответствующие значения контрольных воздушных промежутков d_3^o и d_2^o. Выбор последовательности установки четвертого и второго компонентов в большинстве случаев принципиального значения для сборки не имеет. Пусть за установкой третьего компонента следует установка четвертого компонента. Очевидно, четвертый компонент будет иметь свою ошибку положения Δ_4, величина которой будет зависеть от того, перемещается он по пазу или устанавливается неподвижно. Если четвертый компонент перемещается

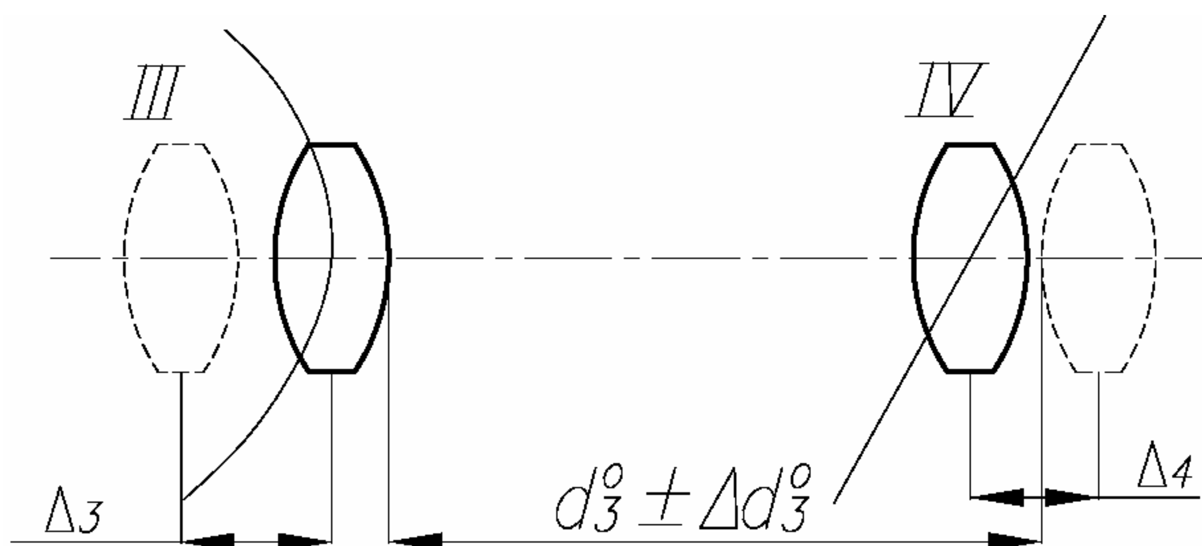


Рис. 3.15. Расположение компонентов при погрешностях сборки

вдоль паза цилиндрического кулачка, то величина Δ_4 будет определяться теми же технологическими погрешностями, что и Δ_3 для третьего компонента. Если же четвертый компонент неподвижен, то его положение будет определяться значительно меньшим числом погрешностей (двумя-тремя).

После установки оси винта четвертого компонента в контрольную точку паза, производится установка контрольного промежутка d_3^o. Совершенно ясно, что при $\Delta_3 = 0$ и идеальной выставке контрольного промежутка $(\Delta d_3 = 0)$, ошибка положения четвертого компонента будет полностью компенсирована.

При этом, если четвертый компонент крепится неподвижно, закон изменения d_3 определяется законом перемещения третьего компонента, а если он перемещается по винтовому пазу, то после выставки d_3^o несовпадение его положения с расчетным не оказывает влияния на закон изменения d_3, т.к. его перемещение и в новом положении происходит по пазу с неизмененным углом подъема во всем диапазоне перемещения компонента. При наличии ошибок положения третьего $(\Delta_3 \neq 0)$ и четвертого $(\Delta_4 \neq 0)$ компонентов, но при $\Delta d_3^o = 0$ произойдет компенсация ошибок положения этих компонентов для выбранного контрольного значения фокусного расстояния объектива. При других значениях фокусного расстояния из-за нелинейности закона перемещения третьего компонента полная компенсация ошибки положения Δ_3 будет невозможна. Вследствие этого требуемый закон изменения d_3 нарушается. Ошибка положения четвертого компонента не приведет к изменению закона d_3, т.к. угол подъема винтового паза, по которому он перемещается, будет постоянным для всех значений воздушного промежутка d_3. Если же

четвертый компонент крепится неподвижно, то, как было сказано выше, изменение воздушного промежутка d_3 будет определяться только законом перемещения третьего компонента.

Все вышеприведенные рассуждения справедливы при условии отсутствия местных ошибок как в криволинейных, так и в винтовых пазах. Случаи, когда эти ошибки имеют место, будут рассмотрены особо. Аналогичные рассуждения могут быть применены к последующей выставке второго и первого компонентов.

Таким образом, можно сделать вывод, что в собранном объективе имеют место ошибки положения третьего компонента - Δ_3, ошибки выставки контрольных воздушных промежутков между третьим и четвертым компонентами - Δd_3^o, между третьим и вторым - Δd_2^o и между вторым и первым компонентами - Δd_1^o.

3.4. Расчет коэффициентов влияния

Сила и степень влияния погрешностей на сдвиг плоскости изображения оценивается с помощью коэффициентов влияния, которые представляют собой отношение величины сдвига $\Delta S'$ плоскости изображения от расчетного положения к величине погрешности Δ, вызывающей этот сдвиг, и обозначается буквой A:

$$A = \frac{\Delta S'}{\Delta}.$$

Коэффициенты влияния определяются в процессе оптического расчета. По существу они представляют собой произведения продольных увеличений компонентов. Так, если в четырехкомпонентном объективе имеются погрешности переменных воздушных промежутков Δd_1, Δd_2, Δd_3, то смещение плоскости изображения можно определить по приближенным, но вполне достаточным для практических целей формулам [36]:

$$\Delta S'_{1d} = -\beta_2^2 \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta d_1 = -A_{1-2} \cdot \Delta d_1;$$

$$\Delta S'_{2d} = -\beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta d_2 = -A_{2-3} \cdot \Delta d_2;$$

$$\Delta S'_{3d} = -\beta_4^2 \cdot \Delta d_3 = -A_{3-4} \cdot \Delta d_3.$$

Если оптические компоненты установлены с ошибками положения, то для смещения плоскости изображения можно записать:

$$\Delta S'_{1\Delta} = \beta_2^2 \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_1 = A_1 \cdot \Delta_1;$$

$$\Delta S'_{2\Delta} = (1-\beta_2^2) \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_2 = A_2 \cdot \Delta_2;$$

$$\Delta S'_{3\Delta} = (1-\beta_3^2) \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_3 = A_3 \cdot \Delta_3.$$

Во всех приведенных формулах β - поперечное увеличение компонентов.

3.5. Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения для объективов типа «Янтарь»

Разработку методики юстировки сдвига плоскости изображения (ПИ) проведем на примере отечественных объективов «Янтарь-21» и «Гранит 10А».

Принципиальная оптическая схема объектива «Янтарь-21» представлена на рис.3.16. Из рис.3.16 видно, что это четырехкомпонентный объектив, первый и четвертый компоненты которого жестко связаны между собой и

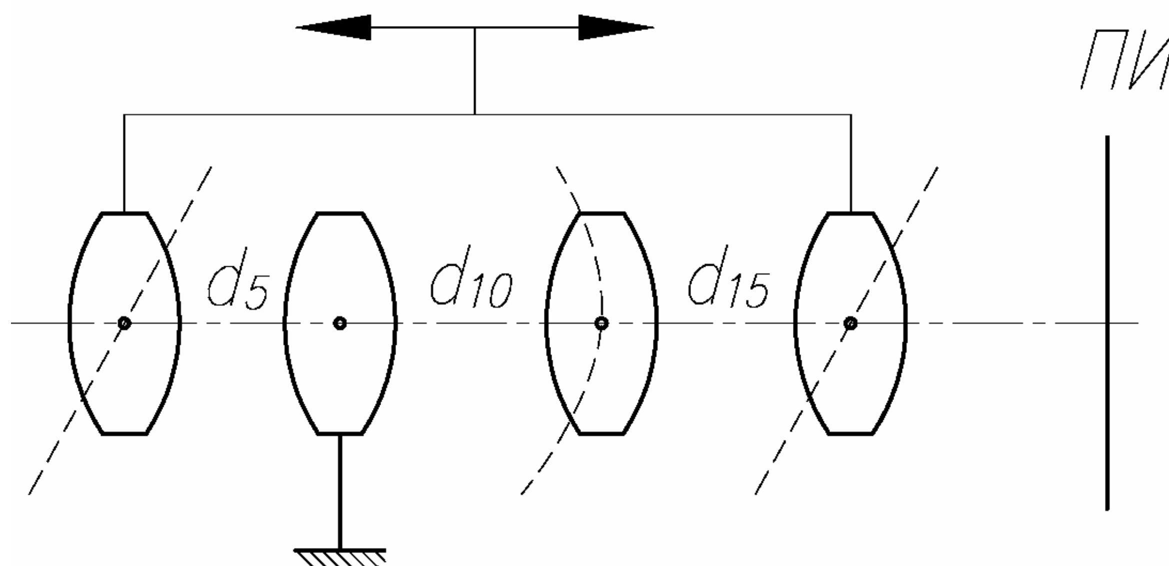


Рис. 3.16. Принципиальная оптическая схема объектива «Янтарь-21»

при изменении фокусного расстояния вместе перемещаются по винтовым пазам; третий компонент движется по криволинейному пазу, а второй компонент неподвижен. Кроме того первый компонент используется еще и для фокусировки объектива. Коэффициенты влияния погрешностей положения третьего компонента и переменных воздушных промежутков приведены в таблице 5.

Таблица 5

A \ f', мм	36	76	136
A_5	0,17	0,75	2,41
A_{10}	1,53	3,14	4,73
A_{15}	0,07	0,34	0,65
A_{III}	±1,46	±2,8	±4,08

Примечание: положительное значение коэффициента влияния A_{III} соответствует смещению третьего компонента в сторону четвертого компонента.

При разработке методики юстировки сдвига ПИ следует всегда придерживаться следующих правил:

– юстировочные подвижки оптических компонентов должны производиться при том значении фокусного расстояния, при котором они будут иметь наименьшие величины;
– юстировочные подвижки должны осуществляться теми компонентами, к которым имеется наиболее простой доступ. Практическое применение этих простых правил позволит предотвратить взаимные столкновения подвижных компонентов, избежать возможность их выпадения из конструкции при юстировке и значительно ускорит проведение юстировочных работ.

Теперь перейдем непосредственно к разработке методики юстировки объектива. В общем случае, после сборки объектива будут иметь погрешности положения третьего компонента Δ_{III}, переменных воздушных промежутков Δd_5, Δd_{10}, Δd_{15} и отклонение базового торца байонета относительно оптики объектива на величину $\Delta S_0'$. Рассмотрим предельно возможный случай, когда смещение ПИ от всех этих погрешностей происходит в одну сторону и результирующее смещение равно их арифметической сумме. В соответствии с табл.5 такой случай представлен на рис.3.17.

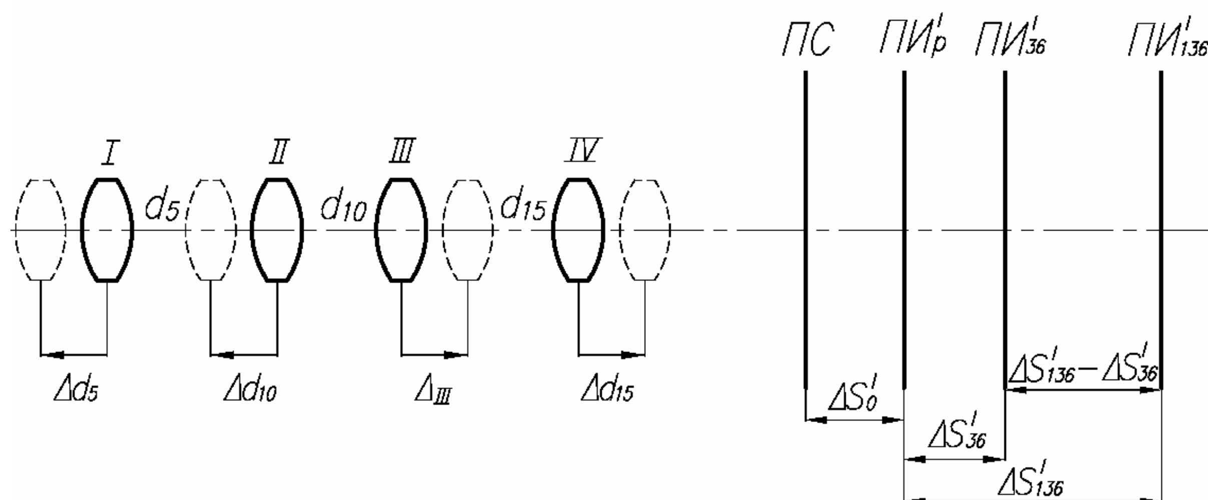


Рис. 3.17. Смещение плоскости изображения при погрешностях установки компонентов

На нем буквами ПС обозначено положение плоскости, находящейся на рабочем расстоянии от торца байонета, а буквами $ПИ_P$ - расчетное положение плоскости изображения при отсутствии каких-либо погрешностей изготовления.

Из-за погрешности установки воздушных промежутков и положения третьего компонента на $f' = 36$ мм ПИ сместится на величину $\Delta S_{36}'$, равную $\Delta S_{36}' = A_5^{36} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15}$ и займет новое положение $ПИ_{36}'$.

В приведенном выражении индекс сверху «36» означает величину фокусного расстояния, для которого берутся коэффициенты влияния. В дальнейшем индекс сверху будет также обозначать фокусное расстояние, которому соответствуют выбранные коэффициенты влияния.

Из-за тех же погрешностей изготовления на $f'=136$ мм плоскость изображения сместится от расчетного положения $ПИ'_P$ на величину $\Delta S'_{136}=A_5^{136}\cdot\Delta d_5+A_{10}^{136}\cdot\Delta d_{10}+A_{III}^{136}\cdot\Delta_{III}+A_{15}^{136}\cdot\Delta d_{15}$, и займет положение $ПИ'_{136}$. При этом $\Delta S'_{136}-\Delta S'_{36}$ с учетом значений A табл.5 будет равна $\Delta S'_{136}-\Delta S'_{36}=2{,}24\Delta d_5+3{,}2\Delta d_{10}+2{,}62\Delta_{III}+0{,}58\Delta d_{15}$.

Компенсация сдвига ПИ должна начинаться с совмещения ПИ с ПС подвижкой всего объектива. Такое начало юстировки объясняется тем, что, во-первых, при подвижке всего объектива не нарушаются промежутки внутри объектива, во-вторых, сама величина подвижки в несколько раз меньше, чем юстировочные подвижки четвертого и первого компонентов, и наконец, кинематическая схема объектива предусматривает подвижку всего объектива при использовании его в режиме макрозумма, что, конечно, значительно сильно упрощает задачу юстировки всем объективом. Очевидно, совмещение ПИ и ПС должно проводиться на $f'=36$ мм, т.к. именно при этом значении фокусного расстояния будет иметь место наименьшее смещение ПИ от расчетного положения (см. табл.5). Установим $f'=36$ мм. Произведем совмещение ПИ с плоскостью сетки.

После совмещения $ПИ'_P$ займет положение левее сетки (рис.3.18,а).

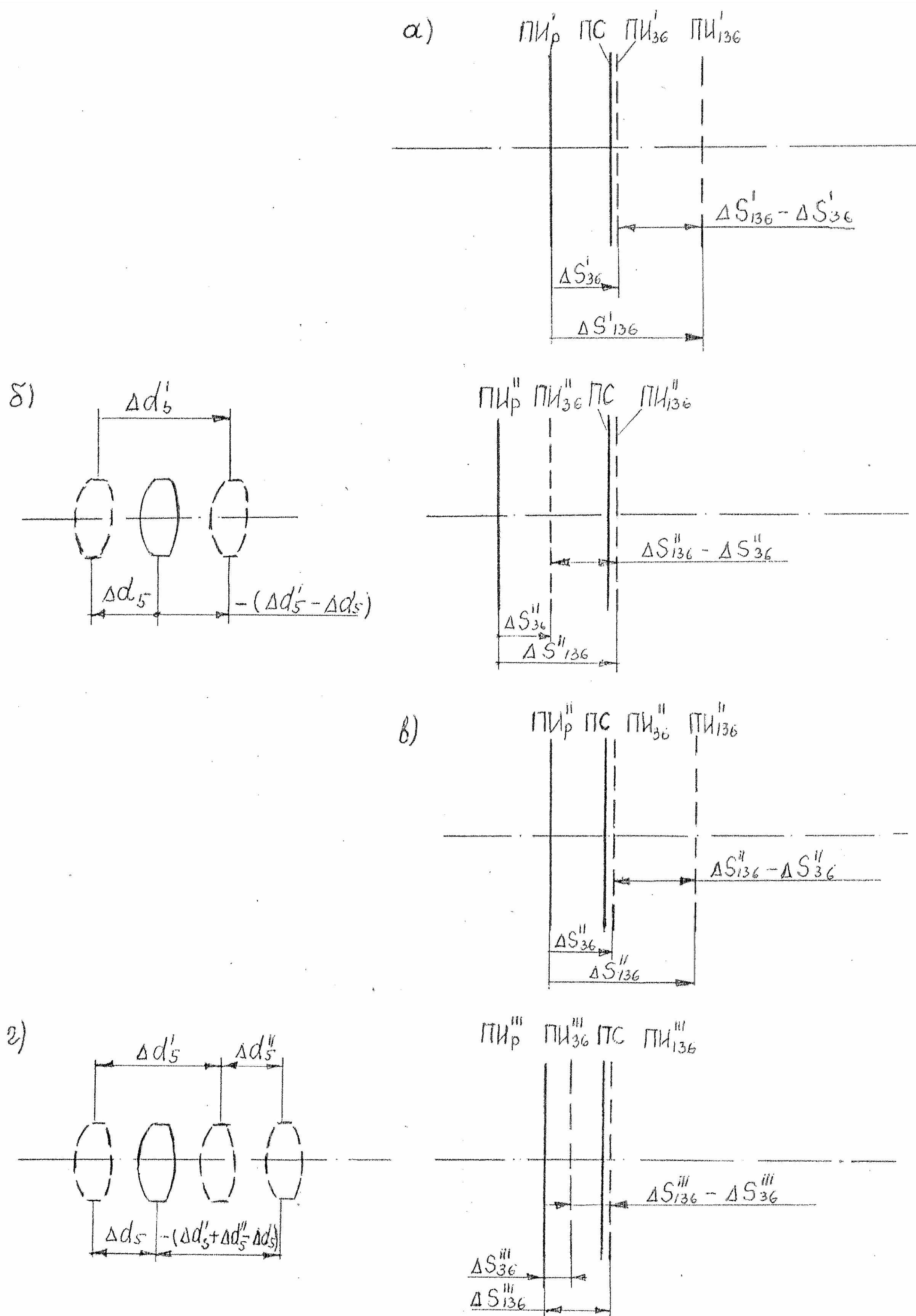

а)
ПИ'р ПС ПИ'36 ПИ'136
ΔS'136 − ΔS'36
ΔS'36
ΔS'136
б)
Δd'5
Δd5
−(Δd'5 − Δd5)
ПИ''р ПИ''36 ПС ПИ''136
ΔS''136 − ΔS''36
ΔS''36
ΔS''136
в)
ПИ''р ПС ПИ''36 ПИ''136
ΔS''136 − ΔS''36
ΔS''36
ΔS''136
г)
Δd'5
Δd''5
Δd5
−(Δd'5+Δd''5−Δd5)
ПИ'''р ПИ'''36 ПС ПИ'''136
ΔS'''136 − ΔS'''36
ΔS'''36
ΔS'''136

Рис. 3.18

При переводе фокусного расстояния на $f' = 136$ мм ПИ сместится от ПС вправо на величину $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}$. Компенсируем ее подвижкой первого компонента на

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}}{A_5^{136}} \qquad (3)\ (\text{рис.3.18,б})$$

В результате смещение ПИ от $ПИ''_P$ будет равно

$$\Delta S''_{136} = -A_5^{136}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} =$$
$$= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} =$$
$$= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + \Delta S'_{136}.$$

Подставив вместо $\Delta d'_5$ его значение (3), получим

$$\Delta S'_{136} = -\frac{A_5^{136}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136} = \Delta S'_{36}.$$

При переводе фокусного расстояния на $f' = 36$ мм ПИ сместится от $ПИ''_P$ на величину (рис.3.18в)

$$\Delta S''_{36} = -A_5^{36}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15} =$$
$$= \Delta S'_{36} - \frac{A_5^{36}}{A_5^{36}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Таким образом, смещение ПИ от ПС будет равно

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Подставив значения A_5^{36} и A_5^{136} из табл.5, получим

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = 0{,}07(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Нетрудно увидеть, что разница в смещениях ПИ на $f' = 136$ мм и $f' = 36$ мм стала почти на порядок меньше, чем исходная величина $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}$. Но и в этом случае она еще достаточно велика. Поэтому вновь установленное $f' = 36$ мм подвижкой всего объектива на величину $\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36}$ совместим ПИ и ПС (рис.3.18в). Затем, переведя фокусное расстояние на $f' = 136$ мм, подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d''_5 = \frac{\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36}}{A_5^{136}} = \frac{A_5^{36}}{(A_5^{136})^2}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Совместим ПИ с ПС (положение $ПИ''_{136}$ см. рис.3.18г). Если мы переведем фокусное расстояние на $f' = 36$ мм, то ПИ сместится от $ПИ'''_P$ в $ПИ'''_{36}$ на

$$\Delta S'''_{36} = -A_5^{36}(\Delta d''_5 + (\Delta d'_5 - \Delta d_5)) + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15} =$$
$$= \Delta S'_{36} - \left(\left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}\right)^2 + \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}\right) \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

а при $f' = 136$ мм на

$$\Delta S'''_{136} = -A_5^{136}(\Delta d''_5 + (\Delta d'_5 - \Delta d_5)) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} =$$

$$= -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36}.$$

От ПС ПИ будет смещена на величину

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = \left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \right)^2 \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0{,}005(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) =$$

$$= 0{,}01\Delta d_5 + 0{,}016\Delta d_{10} + 0{,}003\Delta d_{15}.$$

При погрешностях $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta d_{15} = \Delta_{III} = 0{,}1$ *мм* смещение от ПС будет равно $\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0{,}004$ *мм*, что вполне приемлемо, т.к. полностью входит в глубину резкости объектива (0,035 мм).

Таким образом, по приведенной схеме юстировки даже в самом худшем случае, когда все смещения ПИ от погрешности изготовления складываются в одну сторону, можно добиться почти полной компенсации сдвига ПИ при крайних значениях фокусного расстояния.

Теперь, когда положения ПИ на $f' = 136$ мм и $f' = 36$ мм практически совмещены, выявим величину сдвига ПИ от $ПИ_P$ на других значениях фокусного расстояния - f'. Очевидно,

$$\Delta S'''_{fi} = -A_5^{fi}(\Delta d''_5 + (\Delta d'_5 - \Delta d_5)) + A_{10}^{fi} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{fi} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{fi} \cdot \Delta d_{15} =$$

$$= -A_5^{fi} \cdot \Delta d''_5 - A_5^{fi} \cdot \Delta d'_5 + \Delta S'_{fi}.$$

Вместо $\Delta d''_5$ и $\Delta d'_5$ подставим в эту формулу их выражения, полученные раньше. Тогда

$$\Delta S'''_{fi} = -\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{fi} =$$

$$= -\left(\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2} + \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}} \right) \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{fi}.$$

Смещение ПИ на f'_i от ПС, с которой совмещена ПИ, на $f' = 136$ мм будет равно:

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36} + \left(\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2} + \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}} \right)(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \Delta S'_{fi} =$$

$$= -0{,}07(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36} + \left(0{,}03A_5^{fi} + 0{,}415A_5^{fi}\right)(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \Delta S'_{fi} =$$

$$= (-0{,}07 + 0{,}445A_5^{fi})(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi}).$$

Рассчитаем по полученной формуле смещения ПИ для следующих значений фокусного расстояния: 56, 76, 96, 116, 126. После подстановки коэффициентов влияния получим для

$f' = 56$ *мм* $\quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{56} = -0{,}47\Delta d_{10} - 0{,}46\Delta_{III} - 0{,}06\Delta d_{15}$;

$f' = 76$ *мм* $\quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{76} = -0{,}6\Delta d_{10} - 0{,}6\Delta_{III} - 0{,}12\Delta d_{15}$;

$f' = 96$ *мм* $\quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{96} = -0{,}7\Delta d_{10} - 0{,}7\Delta_{III} - 0{,}11\Delta d_{15}$;

$f' = 116$ *мм* $\quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{116} = -0{,}9\Delta d_{10} - 0{,}9\Delta_{III} - 0{,}1\Delta d_{15}$;

$f' = 126$ *мм* $\quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{126} = -0{,}35\Delta d_{10} - 0{,}33\Delta_{III} - 0{,}06\Delta d_{15}$.

Из приведенных вычислений следует, что, во-первых, сдвиг ПИ на фокусных расстояниях между $f'=36$ мм и $f'=136$ мм определяется в основном погрешностями установки третьего компонента и воздушного промежутка Δd_{10} и, во-вторых, для уменьшения их влияния на сдвиг ПИ, необходимо всегда стремиться к положению, при котором $\Delta_{III}=-\Delta d_{10}$.

Но даже в том случае, когда это равенство не выполняется, а допуски на погрешности имеют вполне приемлемые для условий производства величины, например, $\Delta d_{10}=0{,}015$ *мм*, $\Delta_{III}=0{,}02$ и $\Delta d_{15}=0{,}02$ *мм* сдвиг ПИ относительно ПС не будет превышать 0,030 мм, что входит в глубину резкости объектива и является вполне допустимым.

Пробовать компенсировать сдвиг ПИ $\Delta S'''_{136}-\Delta S'''_{36}$ при фокусном расстоянии f'_i изменением воздушного промежутка d_{10} или смещением третьего компонента практически бесполезно. Такие юстировочные подвижки к положительным результатам не приведут. Поэтому при сборке объектива следует выдерживать Δd_{10} и Δ_{III} в заданных допустимых пределах, а если это не удается, то необходимо стремиться по возможности выполнять условие $\Delta d_{10}=-\Delta_{III}$.

3.6. Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения

Рассмотрим случай, когда выставка контрольных воздушных промежутков и третьего компонента в контрольной точке криволинейного паза происходит при наличии местной ошибки Δh профиля паза кулачка (рис.3.19).

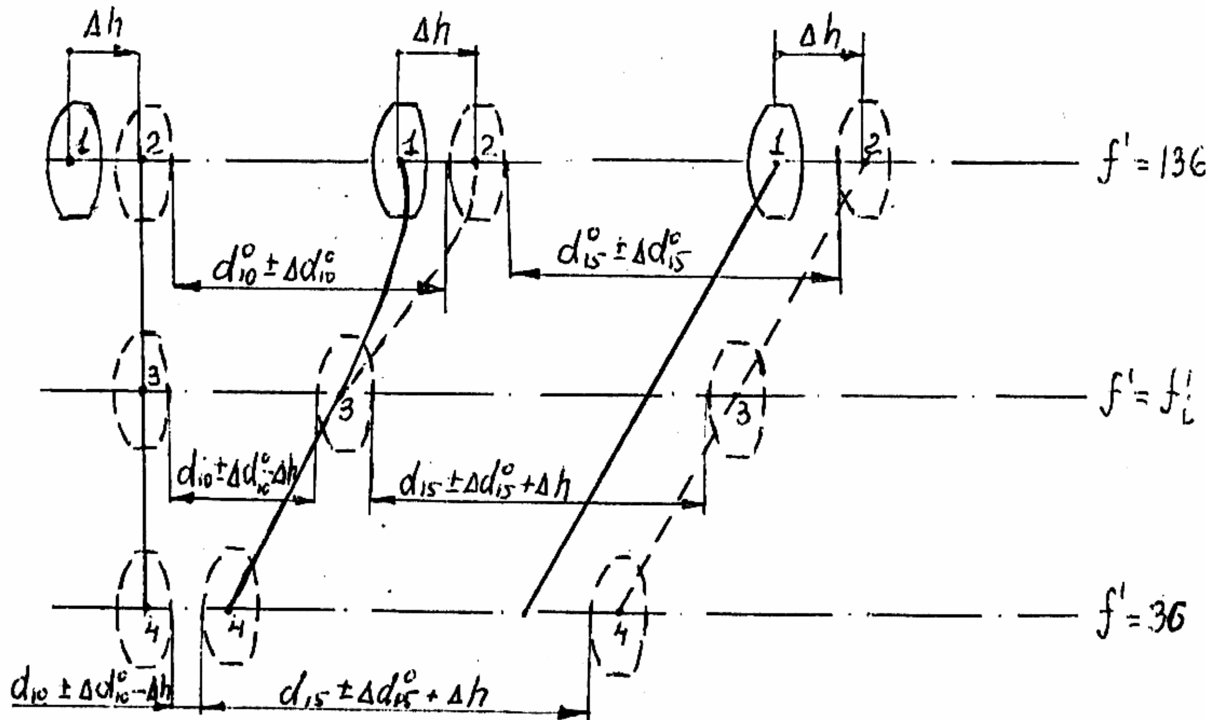


Рис. 3.19. Схема юстировки при наличии местной ошибки Δh

Из-за ошибки Δh третий компонент будет установлен в положение 2, которое отличается от расчетного положения на величину Δh. После выставки контрольных промежутков d_{10}^{o} и d_{15}^{o} второй и четвертый компоненты окажутся смещенными относительно своих минимальных положений также на величину Δh. При вращении кулачка на некотором угле разворота ось винта третьего компонента выйдет на теоретическую кривую (сплошная линия) перемещения третьего компонента.

Очевидно в этом и во всех последующих положениях ошибка положения третьего компонента от Δh будет равна нулю. Но при этом возникнут ошибки переменных воздушных промежутков: d_{10} уменьшится на Δh, а d_{15} увеличится на эту же величину.

В этих новых условиях проведем компенсацию сдвига ПИ по ранее приведенной схеме.

Пусть установка третьего компонента и контрольных воздушных промежутков d_{10}^{o} и d_{15}^{o} производится при $f'=136$ мм (в положении 2). Тогда

$$\Delta S'_{136} = A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136}(\Delta_{III} + \Delta h) + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15},$$

$$\Delta S'_{36} = A_5^{36} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{36}(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36}(\Delta d_{15} + \Delta h).$$

Переведем фокусное расстояние на $f' = 36$ мм и совместим ПИ с ПС. Затем установим $f' = 136$ мм и подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}}{A_5^{136}},$$

компенсируем сдвиг ПИ. При этом ПИ сместится относительно $ПИ'_P$ на

$$\Delta S''_{136} = -A_5^{136}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136}(\Delta_{III} + \Delta h) + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} =$$
$$= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + \Delta S'_{136} = -(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136} = \Delta S'_{36}.$$

А при переводе фокусного расстояния на $f' = 36$ мм ПИ сместится относительно $ПИ'_P$ на

$$\Delta S''_{36} = -A_5^{36}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{36} \cdot (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot (\Delta d_{15} + \Delta h) =$$
$$= -A_5^{36}(\Delta d'_5 + \Delta S'_{36}) = -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136}$$

Отсюда

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Величина эта еще достаточна велика. Поэтому повторим еще раз процесс компенсации сдвига ПИ, получим

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = \left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}\right)^2 (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0{,}005(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

где

$$\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36} = (A_5^{136} - A_5^{36})\Delta d_5 + (A_{10}^{136} - A_{10}^{36})\Delta d_{10} + (A_{III}^{136} - A_{III}^{36})\Delta_{III} + (A_{15}^{136} - A_{15}^{36})\Delta d_{15} +$$
$$+ (A_{10}^{136} + A_{III}^{136} - A_{15}^{36})\Delta h = 2{,}24\Delta d_5 + 3{,}2\Delta d_{10} + 2{,}62\Delta_{III} + 0{,}58\Delta d_{15} + 5{,}54\Delta h.$$

Подставим это выражение в вышеприведенную формулу

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0{,}01\Delta d_5 + 0{,}016\Delta d_{10} + 0{,}013\Delta_{III} + 0{,}003\Delta d_{15} + 0{,}028\Delta h.$$

Если, как и раньше, предположить, что $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta d_{15} = \Delta_{III} = 0{,}1$ *мм*, то $\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0{,}01$ *мм*, что естественно полностью входит в глубину резкости объектива.

Таким образом, наличие местной ошибки в контрольной точке не сказывается на компенсации сдвига ПИ на крайних значениях f'. Определим величину сдвига ПИ на промежуточных значениях фокусного расстояния. Для этого воспользуемся ранее выведенной формулой для сдвига ПИ:

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi}) + (0{,}445 A_5^{fi} - 0{,}07)(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

где с учетом местной ошибки

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = (A_5^{36} - A_5^{fi})\Delta d_5 + (A_{10}^{36} - A_{10}^{fi})\Delta d_{10} + (A_{III}^{36} - A_{III}^{fi})\Delta_{III} + (A_{15}^{36} - A_{15}^{fi})\Delta d_{15} +$$
$$+ (A_{10}^{fi} - A_{10}^{36} + A_{15}^{36} - A_{15}^{fi})\Delta h.$$

Выражение для $(\Delta S'''_{36} - \Delta S'''_{fi})$ было получено выше. Анализ выражений $(\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi})$ и $(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36})$ показывает, что влияние местной ошибки Δh определяется последними слагаемыми.

С учетом высказанного замечания величина ПИ от местной ошибки профиля паза может быть записана

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = ((-A^{36}_{10} + A^{fi}_{10} + A^{36}_{15} - A^{fi}_{15}) + (0{,}445A^{fi}_{5} - 0{,}07) \times (A^{36}_{10} + A^{136}_{III} - A^{36}_{15}))\Delta h =$$
$$= (-1{,}85 + A^{fi}_{10} - A^{fi}_{15} + 2{,}47A^{fi}_{5})\Delta h\,.$$

На основе данных табл.1 рассчитаем по полученной формуле ПИ от Δh

$f' = 56$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{56}) = 1{,}29\Delta h$;

$f' = 76$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{76}) = 2{,}70\Delta h$;

$f' = 96$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{96}) = 4{,}36\Delta h$;

$f' = 116$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{116}) = 5{,}30\Delta h$;

$f' = 126$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{126}) = 6{,}94\Delta h$.

Теперь выставку контрольных промежутков и третьего компонента проведем на другом крайнем значении фокусного расстояния $f' = 36$ мм. Будем, как и в предыдущем случае, считать, что в контрольной точке паза на $f' = 36$ мм имеется местная ошибка Δh. Тогда

$$\Delta S'_{36} = A^{36}_{5} \cdot \Delta d_5 + A^{36}_{10} \cdot \Delta d_{10} + A^{36}_{III}(\Delta_{III} + \Delta h) + A^{36}_{15} \cdot \Delta d_{15}\,;$$
$$\Delta S'_{136} = A^{136}_{5} \cdot \Delta d_5 + A^{136}_{10}(\Delta d_{10} - \Delta h) + A^{136}_{III} \cdot \Delta_{III} + A^{136}_{15}(\Delta d_{15} + \Delta h)\,.$$

А величина сдвига

$$\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36} = (A^{136}_{5} - A^{36}_{5})\Delta d_5 + (A^{136}_{10} - A^{36}_{10})\Delta d_{10} + (A^{136}_{III} - A^{36}_{III})\Delta_{III} + (A^{136}_{15} - A^{36}_{15})\Delta d_{15} +$$
$$+ (A^{136}_{15} + A^{136}_{10} - A^{36}_{III})\Delta h = 2{,}24\Delta d_5 + 3{,}2\Delta d_{10} + 2{,}62\Delta_{III} + 0{,}58\Delta d_{15} + 5{,}54\Delta h\,.$$

После проведения операции компенсации сдвига ПИ на крайних значениях f' получим

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0{,}005(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0{,}01\Delta d_5 + 0{,}016\Delta d_{10} + 0{,}013\Delta_{III} + 0{,}58\Delta d_{15} - 5{,}54\Delta h\,.$$

Сравнивая это выражение с выражением, полученным при выставке контрольных промежутков на фокусном расстоянии $f' = 136$ мм, видим, что разница заключена только в знаке перед слагаемым с Δh.

Рассмотрим изменение величины сдвига ПИ на промежуточных значениях f'_i.

Согласно ранее выведенной формуле

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi}) + (0{,}445A^{fi}_{5} - 0{,}07)(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36})\,,$$

где

$$\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi} = (A^{36}_{5} - A^{fi}_{5})\Delta d_5 + (A^{36}_{10} - A^{fi}_{10})\Delta d_{10} + (A^{36}_{III} - A^{fi}_{III})\Delta_{III} + (A^{36}_{15} - A^{fi}_{15})\Delta d_{15} +$$
$$+ (A^{136}_{III} + A^{fi}_{10} - A^{fi}_{15})\Delta h\,.$$

Сдвиг ПИ только от местной ошибки будет равен

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} = (A^{36}_{III} + A^{fi}_{10} - A^{fi}_{15}) + (0{,}445A^{fi}_{5} - 0{,}07)(A^{136}_{15} - A^{136}_{10} - A^{36}_{III})\Delta h =$$
$$= (-2{,}47A^{fi}_{5} + A^{fi}_{10} - A^{fi}_{15} + 1{,}85)\Delta h\,.$$

Подставив в эту формулу значения коэффициентов влияния для f'=56; 76; 96; 116; 126, получим

$f_i' = 56$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{56}) = 3{,}00\Delta h$;

$f_i' = 76$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{76}) = 2{,}70\Delta h$;

$f_i' = 96$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{96}) = 2{,}14\Delta h$;

$f_i' = 116$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{116}) = 2{,}09\Delta h$;

$f_i' = 126$ *мм* $(\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{126}) = 0{,}76\Delta h$.

Из приведенных вычислений следует, что при наличии местной ошибки одной и той же величины в контрольных точках паза на крайних значениях фокусного расстояния, ее влияние на сдвиг ПИ при выставке контрольных промежутков и третьего компонента на $f' = 136$ мм более чем в два раза выше, чем при юстировке на $f' = 36$ мм во всем диапазоне изменения фокусного расстояния.

3.7. Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения в объективах типа «Гранит»

Рассмотрим методику юстировки объектива с другой, более распространенной, кинематической схемой. На рис.3.20 представлена принципиальная оптическая схема объектива киносъемочного аппарата на 8 мм (формат пленки типа S).

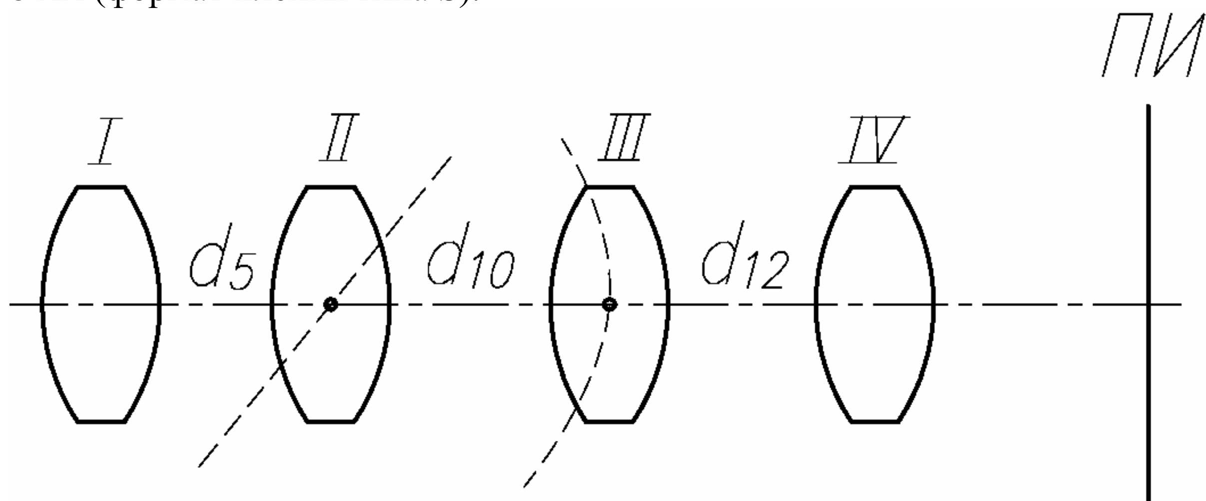


Рис. 3.20. Принципиальная оптическая схема объектива “Гранит”

Из рис.3.20 видно, что его схема, как и предыдущего объектива, четырехкомпонентная. Первый компонент дистанционный, при фокусировке объектива перемещается вдоль оси объектива по окулярной резьбе. Второй – вариатор, перемещается по винтовому пазу цилиндрического кулачка. Третий – компенсатор, перемещается по криволинейному пазу, а четвертый компонент неподвижный.

Коэффициенты влияния погрешностей переменных воздушных промежутков и положения третьего компонента на сдвиг ПИ приведены в табл.6.

Таблица 6

A_i \ f', *мм*	7	17,6	47
A_5	0,03	0,15	1,07
A_{10}	0,17	0,22	0,16
A_{15}	0,57	0,57	0,57
A_{III}	–0,4	–0,35	–0,41

Как и в предыдущем варианте объектива рассмотрим идеальный случай, когда смещение ПИ от всех погрешностей происходит в одну сторону, а результирующее смещение равно их арифметической сумме (рис.3.21). Так как на начальном этапе юстировки сдвига ПИ совмещают ПИ на крайних значениях диапазона изменения фокусного расстояния, представим исходное положение ПИ на $f'=7$ мм и $f'=47$ мм от погрешностей установки Δd_5, Δd_{10}, Δ_{III}, Δd_{12} (рис.3.22).

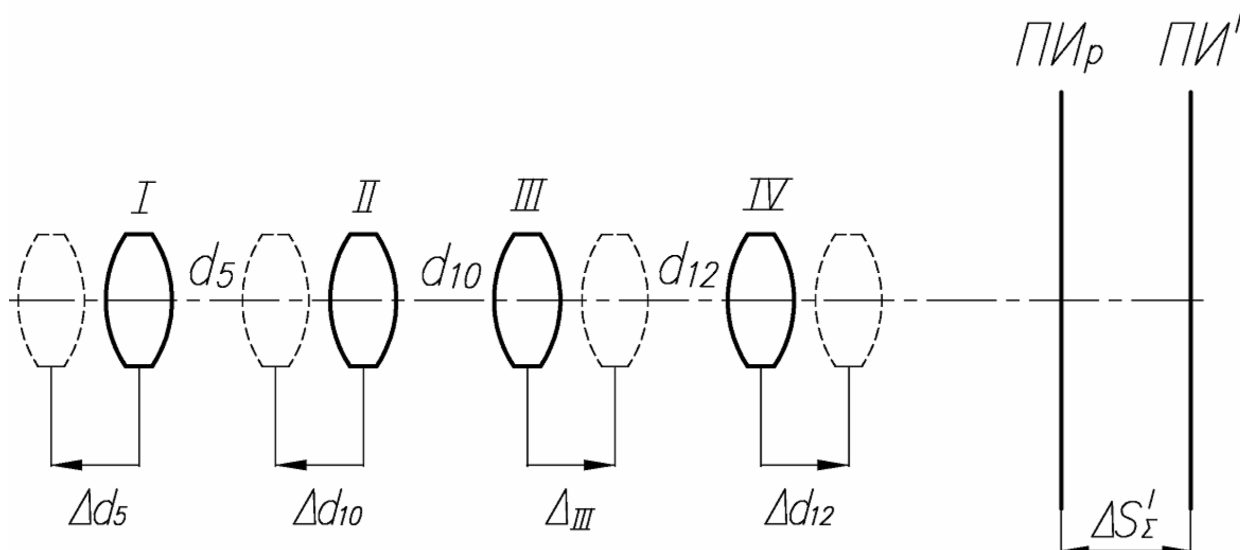


Рис. 3.21. Смещение плоскости изображения при погрешностях установки компонентов

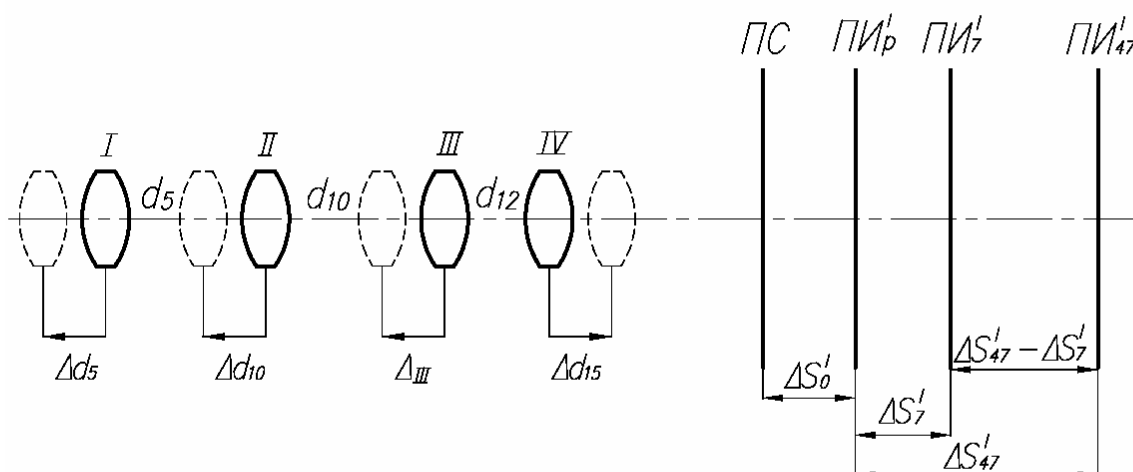


Рис. 3.22. Смещение плоскости изображения на $f' = 7$ мм и $f' = 47$ мм

Все обозначения на рисунках те же, что и на рисунках объектива «Янтарь-21». Смещение ПИ на $f' = 47$ мм от своего расчетного положения будет равно

$$\Delta S'_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} + A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12},$$

а на $f' = 7$ мм

$$\Delta S'_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} + A_{12}^7 \cdot \Delta d_{12}.$$

Для величины взаимного сдвига на этих значениях фокусного расстояния можно записать

$$\Delta S'_{47} - \Delta S'_7 = (A_5^{47} - A_5^7)\Delta d_5 + (A_{10}^{47} - A_{10}^7)\Delta d_{10} + (A_{III}^{47} - A_{III}^7)\Delta_{III} + (A_{12}^{47} - A_{12}^7)\Delta d_{12}$$

Компенсацию сдвига ПИ относительно ПС будем производить четвертым компонентом на $f' = 7$ мм. При этом четвертый компонент будем перемещать до тех пор, пока $ПИ'_7$ не совпадет с ПС (положение $ПИ''_7$) (рис.3.23).

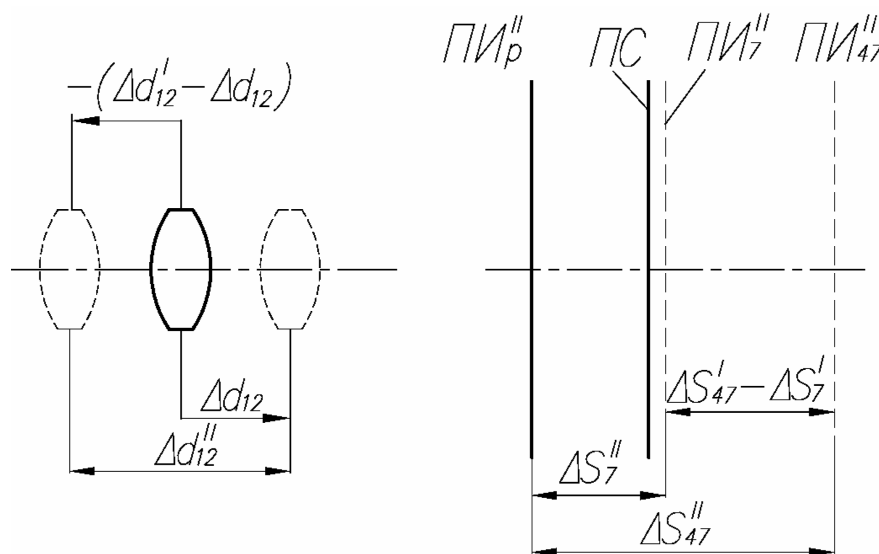


Рис. 3.23. Компенсация сдвига плоскости изображения изменением промежутка Δd_{12}

Величина этого перемещения будет равна

$$\Delta d'_{12} = \frac{\Delta S'_0 - \Delta S'_7}{A_{12}^7}.$$

Отсюда

$$\Delta S''_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7 (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \Delta S'_7 - A_{12}^7 \cdot \Delta d'_{12} = \Delta S'_0;$$

$$\Delta S''_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} - A_{12}^{47} (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \Delta S'_{47} - \frac{A_{12}^{47}}{A_{12}^7} (\Delta S'_0 - \Delta S'_7).$$

А так как $A_{12}^{47} = A_{12}^7$ (табл.6), то

$$\Delta S''_{47} = \Delta S'_{47} - (\Delta S'_0 - \Delta S'_7).$$

Определим величину $\Delta S''_{47} - \Delta S''_7$, которая в данном случае является смещением ПИ от ПС на $f' = 47$ мм.

$$\Delta S''_{47} - \Delta S''_7 = \Delta S'_{47} - \Delta S'_7.$$

Компенсируем ее подвижкой первого компонента при $f' = 47$ мм на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S''_{47} - \Delta S''_7}{A_5^{47}}.$$

При этом ПИ совместится с ПС (рис.3.24).

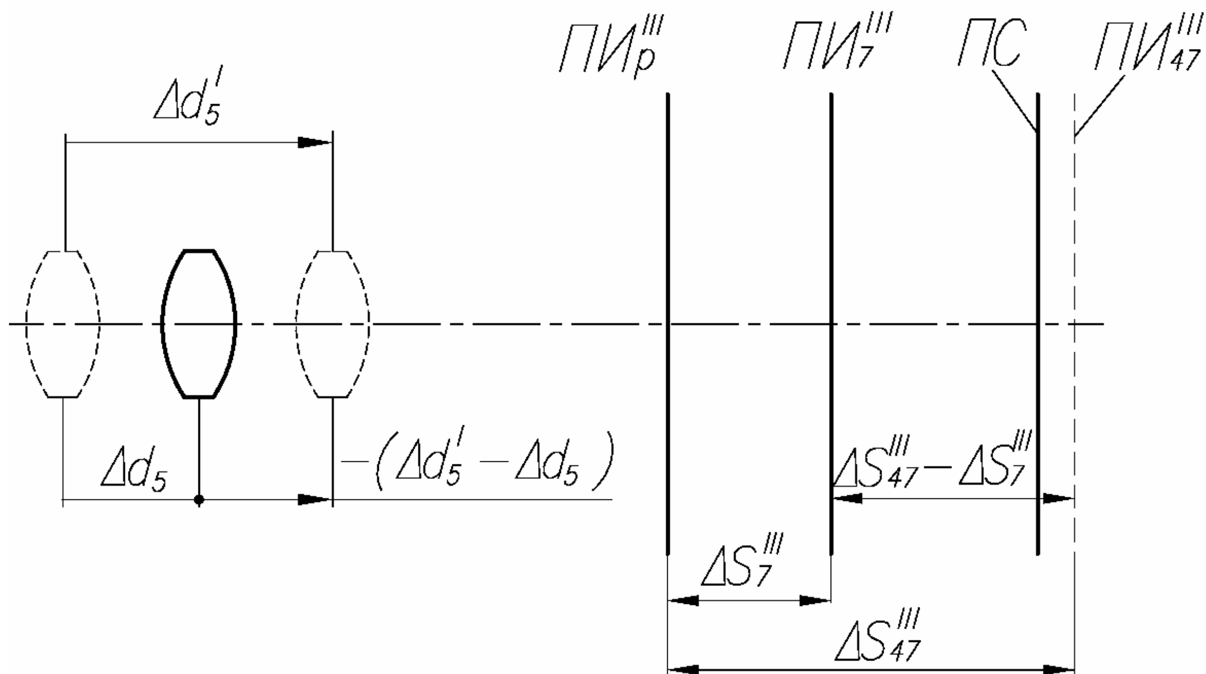


Рис. 3.24. Компенсация сдвига плоскости изображения изменением промежутка Δd_5

Тогда

$$\Delta S_{47}'''' = -A_5^{47}(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} - A_{12}^{47}(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) =$$
$$= -A_5^{47} \cdot \Delta d_5' + \Delta S_{47}' - A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12}' = -(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') - (\Delta S_0' + \Delta S_7') =$$
$$= -\Delta S_0' = \Delta S_7'';$$
$$\Delta S_7'''' = -A_5^7(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) =$$
$$= -A_5^7 \cdot \Delta d_5' + \Delta S_7' - A_{12}^7 \cdot \Delta d_{12}' = -\frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') - (\Delta S_0' + \Delta S_7') =$$
$$= -\frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') - \Delta S_0'.$$

Сдвиг ПИ

$$\Delta S_{47}'''' - \Delta S_7'''' = \frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7'),$$

но т.к. $A_5^{47} \approx 1$, то можно записать $\Delta S_{47}'''' - \Delta S_7'''' = A_5^7(\Delta S_{47}' - \Delta S_7')$.

Подставив в это выражение значения коэффициентов влияния из табл.6, окончательно получим $\Delta S_{47}'''' - \Delta S_7'''' = 0{,}03\Delta d_5 - 0{,}0003\Delta d_{10} - 0{,}0003\Delta_{III}$. Из этого уравнения следует, что для получения минимального сдвига ПИ необходимо стремиться к получению как можно меньшей величины Δd_5. Но даже без учета этого положения сама по себе величина сдвига весьма мала.

Пусть $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta_{III} = \Delta d_{12} = 0{,}1$ *мм*, тогда $\Delta S_{47}'''' - \Delta S_7'''' = 0{,}003$ *мм*, что несоизмеримо меньше глубины резкости объектива (0,02 мм).

Теперь, когда на крайних значениях фокусного расстояния ПИ совмещены, определим сдвиг ПИ для любого значения f_i' внутри диапазона изменения фокусных расстояний

$$\Delta S_{fi}'''' = -A_5^{fi}(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{fi} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{fi} \cdot \Delta_{III} + A_{12}^{fi}(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) =$$
$$= -A_5^{fi}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'')\Big/A_5^{47} + \Delta S_{fi}' - A_{12}^{fi}(\Delta S_0' + \Delta S_7')\Big/A_{12}^7 =$$
$$= -\frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') + \Delta S_{fi}' - \frac{A_{12}^{fi}}{A_{12}^7}(\Delta S_0' + \Delta S_7').$$

Смещение ПИ при фокусном расстоянии f_i' относительно положения ПИ на $f' = 47$ мм будет равно

$$\Delta S_{47}'''' - \Delta S_{fi}'''' = -\Delta S_0' + \frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}} - \Delta S_{fi}' + \frac{A_{12}^{fi}}{A_{12}^7}\Delta S_0' + \frac{A_{12}^{fi}}{A_{12}^7}\Delta S_7'.$$

Коэффициент влияния изменения d_{12} на всех значениях фокусного расстояния равен 0,57 (табл.6), то окончательно можно записать

$$\Delta S_{47}'''' - \Delta S_{fi}'''' = \frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}\Delta S_{47}' + \left(1 - \frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}\right)\Delta S_7' - \Delta S_{fi}'.$$

Расчет этой величины проведем для фокусных расстояний 13; 18; 28; 38; 43 *мм*. Значения коэффициентов влияния возьмем из графиков, представленных на рис.3.25. Результаты расчетов приведены в табл.7.

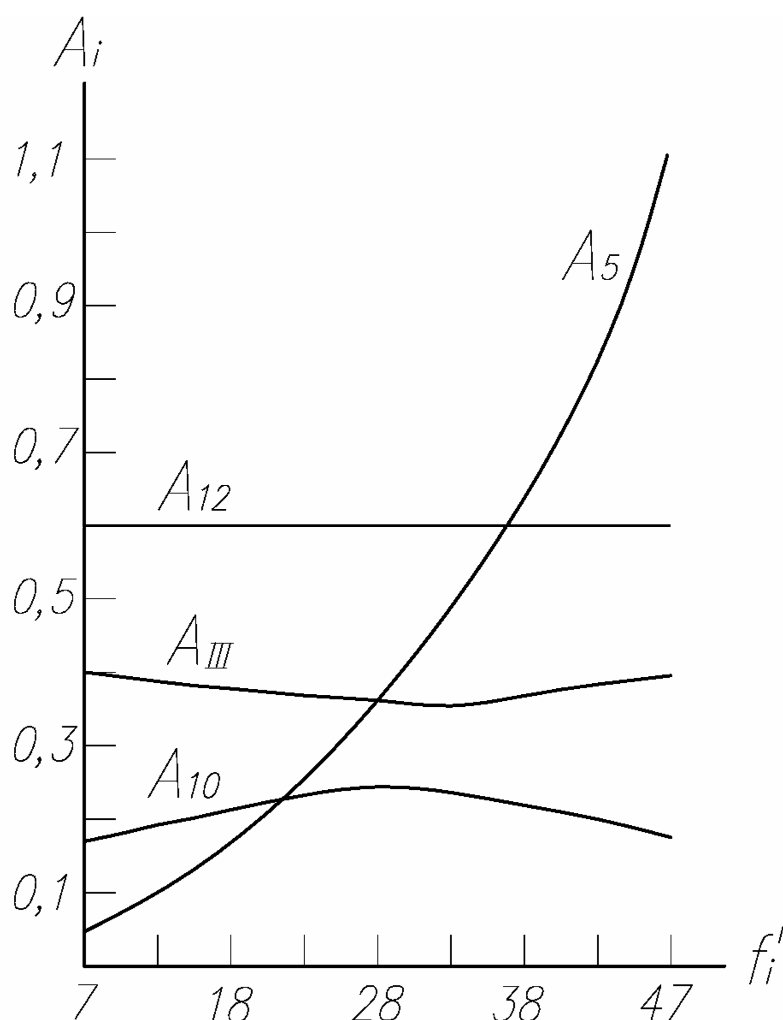


Рис. 3.25. Изменение коэффициентов влияния при изменении f' от 7 до 47 мм

Из приведенных результатов вычислений следует, что для промежуточных значений фокусного расстояния основную и наиболее весомую часть в сдвиг ПИ вносят погрешности воздушного промежутка Δd_{10} и установки третьего компонента в расчетную точку паза. Для уменьшения их влияния при сборке всегда необходимо стремиться к такому положению, чтобы $\Delta d_{10} = \Delta_{III}$. Но даже при наличии погрешностей порядка 0,1 мм, что из-за большой величины встречается крайне редко, смещение ПИ в самом худшем случае ($f' = 28$ *мм*) не будет превышать 0,017 мм, что входит в глубину резкости объектива (0,02 мм).

Таблица 7

f_i'	$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7'''$
13	$0{,}028\Delta d_5 - 0{,}021\Delta d_{10} + 0{,}04\Delta_{III}$
18	$0{,}028\Delta d_5 - 0{,}057\Delta d_{10} + 0{,}058\Delta_{III}$
28	$0{,}02\Delta d_5 - 0{,}073\Delta d_{10} + 0{,}08\Delta_{III}$
38	$0{,}01\Delta d_5 - 0{,}06\Delta d_{10} + 0{,}057\Delta_{III}$
43	$0{,}007\Delta d_5 - 0{,}058\Delta d_{10} + 0{,}02\Delta_{III}$

3.8. Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения

Рассмотрим случай, когда выставка третьего компонента и контрольных воздушных промежутков производится при наличии местной ошибки Δh в контрольной точке профиля криволинейного паза.

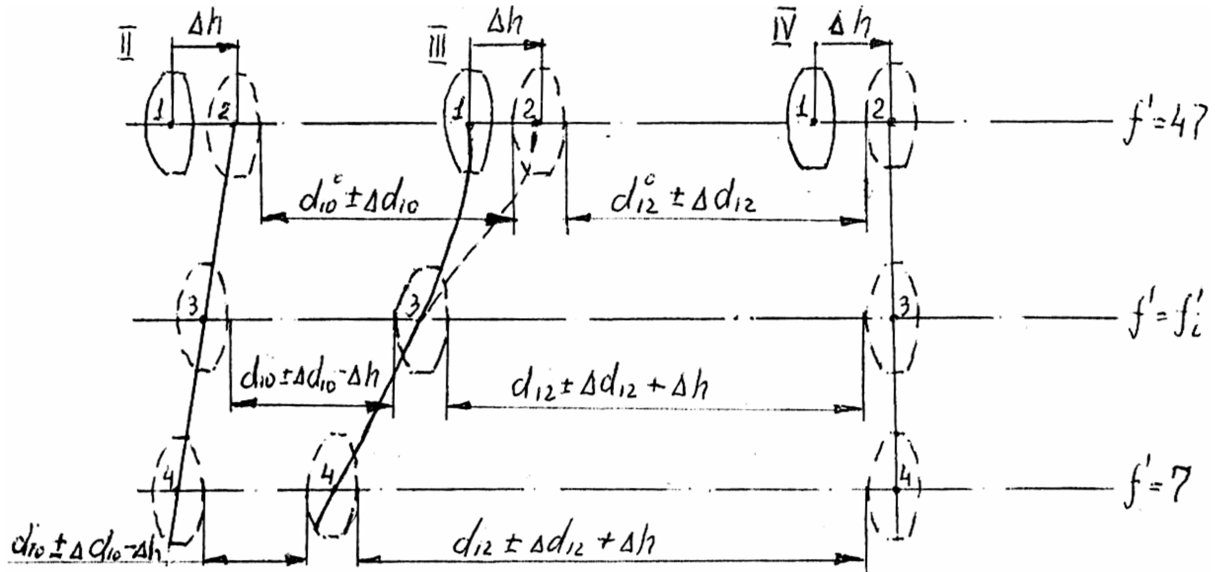


Рис. 3.26. Юстировка промежутков при наличии местной ошибки Δh

На основе рис.3.26 запишем:

$$\Delta S'_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47}(\Delta_{III} + \Delta h) + A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12};$$

$$\Delta S'_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} + A_{12}^7(\Delta d_{12} + \Delta h).$$

Совместим ПИ с ПС на $f' = 7$ мм подвижкой четвертого компонента на

$$\Delta d'_{12} = \frac{\Delta S'_0 + \Delta S'_7}{A_{12}^7}.$$

При этом, как и ранее, получим

$$\Delta S''_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47}(\Delta_{III} + \Delta h) - A_{12}^{47}(\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) =$$

$$= A_{12}^{47} \cdot \Delta d'_{12} + \Delta S'_{47} + A_{III}^{47} \cdot \Delta h = (\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) - \Delta S'_0 + A_{III}^{47} \cdot \Delta h;$$

$$\Delta S''_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7(\Delta d'_{12} - (\Delta d_{12} + \Delta h)) =$$

$$= \Delta S'_7 - A_{10}^7 \cdot \Delta h - A_{12}^7 \cdot \Delta d'_{12} + A_{12}^7 \cdot \Delta h = -\Delta S'_0 + (A_{12}^7 - A_{10}^7)\Delta h;$$

$$\Delta S''_{47} - \Delta S''_7 = (\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7)\Delta h.$$

Подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S''_{47} - \Delta S''_7}{A_5^{47}} = \frac{(\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7)\Delta h}{A_5^{47}}$$

совместим ПИ с ПС. Для вновь полученного расположения

$$\Delta S'''_{47} = -A_5^{47}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47}(\Delta_{III} + \Delta h) - A_{12}^{47}(\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) =$$

$$= \Delta S'_0 + (A_{12}^7 - A_{10}^7)\Delta h = \Delta S''_7$$

$$\Delta S_7''' = -A_5^7(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^7(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7(\Delta d_{12}' - (\Delta d_{12} + \Delta h)) =$$

$$= -A_5^7 \frac{(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') + (A_{III}^{47} + A_{10}^7 - A_{12}^7)}{A_5^{47}} + \Delta S_7'' .$$

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = \Delta S_7'' + \frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7' + (A_{III}^7 + A_{10}^7 - A_{12}^7)\Delta h) - \Delta S_7'' ,$$

а так как $A_5^{47} \approx 1$, то

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = A_5^7(\Delta S_{47}' - \Delta S_7' + (A_{III}^7 + A_{10}^7 - A_{12}^7)\Delta h) .$$

После подстановки значений коэффициентов влияний получим

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = 0{,}03(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') - 0{,}024\Delta h .$$

Второе слагаемое этого выражения определяет степень влияния местной ошибки на величину сдвига ПИ. При $\Delta h = 0{,}1$ добавление к сдвигу будет составлять 0,0024 мм, т.е. реально величина неощутимая. А теперь рассмотрим влияние Δh на сдвиг ПИ на промежуточных значениях f_i'.

$$\Delta S_{fi}''' = -A_5^{fi}(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{fi}(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{47}\Delta_{III} - A_{12}^{fi}(\Delta d_{12}' - (\Delta d_{12} - \Delta h)) =$$

$$= \Delta S_{fi}' - \frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7)\Delta h - A_{10}^{fi} \cdot \Delta h -$$

$$- \frac{A_{127}^{fi}}{A_{12}^7}(\Delta S_0' + \Delta S_7') + A_{12}^{fi} \cdot \Delta h = \Delta S_{fi}' - \frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7)\Delta h +$$

$$+ (A_{12}^{fi} - A_{10}^{fi})\Delta h - (\Delta S_0' + \Delta S_7') .$$

Сдвиг ПИ будет равен

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_{fi}''' = (A_5^{fi} \cdot \Delta S_{47}' + \left(1 - A_5^{fi}\right)\Delta S_7' - \Delta S_{fi}') + (-0{,}17 + A_{10}^{fi} - 0{,}8A_5^{fi})\Delta h .$$

Степень влияния местной ошибки на сдвиг ПИ определяется коэффициентом $(-0{,}17 + A_{10}^{fi} - 0{,}8A_5^{fi})$. Для фокусных расстояний 13; 18; 28; 38; 43 *мм* рассчитаны значения добавок к сдвигу ПИ от Δh (табл.8).

Таблица 8

f_i'	$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7'''$
13	–0,04
18	–0,07
28	–0,22
38	–0,47
43	–0,59

Из приведенных данных следует, что влияние местной ошибки увеличивается с возрастанием фокусного расстояния и на наибольших значениях становится весьма значительным.

3.9. Особенности центрировки

Практика точностного анализа и изготовления ОПФР показала, что в объективах с трех, а иногда и четырехкратным перепадом фокусного расстояния, точность положения оптических элементов в большинстве случаев может быть обеспечена изготовлением деталей по допускам. В объективах с большими перепадами фокусных расстояний изготовление деталей на современном уровне точности изготовления не позволяет получить объективы требуемого качества изображения и поэтому при своем изготовлении и сборке они требуют введения юстировочных операций. Все современные ОПРФ с большой кратностью состоят из двух и более десятков линз, имеют точную механику, поэтому выявление технологических погрешностей, вызвавших появление аберраций, децентрировок в полностью собранном объективе, представляет собой достаточно сложную задачу. В связи с чем при разработке методики юстировки очень важно определить основной принцип ее построения. Но и сейчас уже достаточно ясно, что во всех случаях следует стремиться к созданию так называемого покомпонентного контроля и устранения децентрировок. Только после этого можно проводить окончательную сборку ОПФР. Выполнение этого в общем-то простого принципа позволяет в дальнейшем значительно упростить сборку объективов и заметно повысить качество ее проведения. Теперь посмотрим как должны проводиться поузловой контроль и юстировка. Во всех известных трансфокаторах и в некоторой части вариобъективов аберрации последнего компонента обычно хорошо скорректированы. Это позволяет контролировать степень его децентрировки на любой оптической скамье. Контроль осуществляется по искажению дифракционного изображения точки и чаще всего по наличию комы децентрировки в центре поля зрения. Если кома децентрировки недопустимо велика, то поперечными перемещениями или разворотами наиболее сильно влияющей на кому линзы устраняют ее. Бывают случаи, когда собственная коррекция аберраций последнего компонента настолько слаба, что на оптической скамье не наблюдается изображение точки. Наблюдается большое размытое пятно. В этих случаях рассчитывают и изготавливают компенсатор, который состоит из двух, трех линз, а его аберрация по величине и знаку равны аберрации предшествующей части объектива для одного из значений фокусного расстояния. При юстировке последнего компонента этот компенсатор устанавливают перед ним в единую корпусную деталь, но с возможностью проведения юстировочных подвижек линз. Часто в условиях производства применяют другой вариант контроля и юстировки децентрировок. Он заключается в следующем. Последний компонент устанавливают по посадочным поверхностям в оправу, закрепленную в патроне шпинделя станка. Посадочные места оправы предварительно тщательно проверяют на предмет торцевого и

радиального биения. Если величина биений велика, то, не снимая оправы, ее «пропыляют». Далее, на направляющие станки устанавливают автоколлимационный микроскоп ЮС-13.

Микроскоп последовательно фокусируют на изображения центров кривизны всех оптических поверхностей линз компонента и, вращая шпиндель станка, определяют величину биений изображений центров кривизны. Зная увеличение, переходят к децентрировке действительных центров кривизны оптических поверхностей. Если эти величины для каких-то линз окажутся больше требований, записанных в чертежах, то компонент должен быть разобран, а линзы с плохой центрировкой заново отцентрированы.

По такой схеме контролируются децентрировки всех оптических элементов объектива. Расчет положений автоколлимационных изображений центров кривизны и увеличение должны заранее рассчитываться и вводиться в комплект конструкторской документации. После проведения покомпонентного контроля децентрировок и аттестации оптических узлов в окончательно собранном объективе все же возможно появление децентрировок. Для определения причин их появления устанавливают объектив на оптическую скамью и, изменяя фокусное расстояние, определяют на каком из них появилась кома децентрировки. Она может появиться как при больших, так и при малых значениях фокусного расстояния. Если кома возникает при больших значениях, а при остальных сильно уменьшается или совсем исчезает, то причиной ее появления чаще всего является децентрировка линз первого или второго компонентов. Об этом более подробную информацию могут дать коэффициенты влияния децентрировок. Экспериментально же проверка осуществляется на наибольшем значении фокусного расстояния разворотом первого компонента. При этом, естественно, происходит его продольное перемещение, следовательно, осевое перемещение плоскости изображения. Но перефокусируя микроскоп, можно вновь увидеть дифракционное изображение точки. Если при этом наблюдается разворот дифракционного изображения точки с комой, то значит в первом компоненте какая-то линза или группа линз децентрированы. Если же такого разворота не наблюдается, то тогда, скорее всего, децентрирован второй компонент или составляющие его линзы. При появлении комы на малых значениях фокусного расстояния причиной в большинстве случаев является децентрировка линз последнего компонента. Проверка, как и в предыдущем случае, осуществляется его разворотом, а устранение - подвижками наиболее влияющими на кому децентрировки линзами.

При поиске причин децентрировок в вариаторе и компенсаторе обычно возникают трудности, которые не всегда можно преодолеть. Связаны они с невозможностью подобраться к ним, когда объектив полностью собран. Поэтому, когда становится ясным, что ни первый, ни последний компоненты не вносят кому децентрировки, полностью выкручивают из

корпуса первый компонент и разворачивают оптику второго компонента. После чего устанавливают в исходное положение первый компонент и наблюдают дифракционное изображение точки. Если кома децентрировки развернулась, то совершенно ясно, что причина ее появления находится во втором компоненте. При отсутствии ее разворота, причина ее появления находится в третьем компоненте.

Наконец, следует отметить, что если габариты объектива позволяют не только установить его в объективодержатель оптической скамьи, но и вращать вокруг оси, то имеется хорошая возможность контролировать децентрировки всех оптических поверхностей объектива с помощью автоколлимационного микроскопа ЮС-13.

При оценке качества изображения на оптической скамье часто наблюдается поперечное смещение изображения при изменении фокусного расстояния. Причиной такого смещения обычно является заклон оси объектива относительно оси коллиматора оптической скамьи.

Для устранения такого перемещения:

1. устанавливают минимальное значение фокусного расстояния $f'_{\min}$ объектива, так как, именно на этом значении фокусного расстояния будет иметь место наименьшее смещение изображения с оси коллиматора.
2. совмещают центр изображения сетки коллиматора с центром сетки измерительного микроскопа подвижками последнего.
3. устанавливают наибольшее значение фокусного расстояния $f'_{\max}$ и разворотами объектива добиваются совмещения центра изображения сетки коллиматора с центром сетки микроскопа.
4. устанавливают $f'_{\min}$ и далее повторяют пп.2,3.

При юстировке пп.1-3 повторяется до тех пор, пока не будет отсутствовать поперечное смещение изображения при изменении фокусного расстояния.

Литература

1. Цуккерман С.Т. Точные механизмы. М., Оборонгиз, 1941.
2. Warmigsheim. SMPTE. 1932, т.19, №4, стр.329-339.
3. Бардин А.Н. Сборка и юстировка оптических приборов. Изд. «Высшая школа», М., 1968.
4. Новик Ф.С. и Ногин П.А. Киносъемочная оптика. Изд. «Искусство», М., 1968.
5. Плотников В.С. и др. Расчет и конструирование оптико-механических приборов. Изд. «Машиностроение», М., 1972.
6. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Изд. «Машиностроение», Л., 1968.
7. Литвин Ф.П. Проектирование механизмов и деталей приборов. Л., «Машиностроение», 1973.
8. Погорев Г.В. Юстировка оптических приборов. Изд. «Машиностроение», Л., 1968.
9. Анащенко Н.Д. Общий курс кинематографии, т.1, М., «Теокинопечать», 1929.
10. Волосов Д.С. Методы расчета сложных фотографических систем. Гостехиздат, 1948.
11. Prodact Engineering, 1967, Bd38, N18.
12. Патент США № 1947669, 1931.
13. Патент США № 2165341, 1936.
14. Naumann H.Feinwerktechnik, 1968, 72, №6.
15. Патент Франции № 2873646, 1954.
16. Патент США № 1898471, 1929.
17. Патент Австрии № 3059534, 1959.
18. Патент США № 3106125, 1960.
19. Артоболевский И. И. Теория механизмов для воспроизведения плоских кривых. М., Издательство АН СССР, 1959.
20. Патент США № 4130347, 1934.
21. Патент Японии № 9950, 1961.
22. Патент США № 3051048, 1960.
23. Патент США № 2.078.586, 1933.
24. Патент США № 2.566.485, 1950.
25. Патент США № 2.732.763, 1953.
26. Патент США № 3.094.581, 1960.
27. Back F., Lowen H., JOSA, 1954, 44.
28. Патент СССР № 155959, 1962.
29. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. М., Издательство АН СССР, 1949.
30. Крынин Л.И. Основы проектирования конструкций объективов. С.-Петербург, Издательство «ИВА», 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИТМО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ
«Образование»

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА СИСТЕМОТЕХНИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

Кафедра системотехники оптических приборов и комплексов организована в 1978 г. на базе ЛОМО – ведущего оптического предприятия России, имеющего многолетние традиции в оптике и высокий технический потенциал. Кафедра готовит специалистов по современным направлениям оптического приборостроения, оптико-электронным комплексам, лазерной техники, приборам ночного видения, медицинским приборам, микроскопии и другим. Кроме того, кафедра является базой университета при организации производственной практики, курсового и дипломного проектирования, а также учебно-исследовательских работ для студентов старших курсов направлений «Приборостроение» и «Оптотехника».

Кафедра готовит инженеров по специальности оптико-электронные приборы и системы.

Обучение на базовой кафедре, расположенной на территории ОАО «ЛОМО», начинается с V курса, после изучения естественных, общетехнических и специальных дисциплин в университете. Студенты обучаются по индивидуальному плану и изучают дисциплины специализации: «Теоретические основы обеспечения качества оптических приборов», «Системное проектирование оптических приборов», «Методы проектирования сложных оптико-электронных систем и комплексов»,

«Проектирование объективов, технология их изготовления и контроль» и другие, выполняют два курсовых и дипломный проекты.

Обучение студентов проводится на современном оборудовании лабораторий ЦКБ, непосредственно на рабочих местах конструкторов. Студенты используют вычислительную технику, стендовое оборудование отделов, а также форд технической библиотеки предприятия. Тематика курсовых и дипломных проектов соответствует направлениям научной и производственной деятельности ОАО «ЛОМО». По окончании базовой кафедры выпускникам гарантируется рабочее место на предприятии.

Базовая кафедра организует целевую подготовку студентов для многих кафедр университета. В этом случае студенты, продолжая обучение на своей кафедре, курсовые и дипломные проекты пишут на ЛОМО в конструкторских бюро, соответствующих по профилю их специальности. А начать знакомство с фирмой можно на IV курсе в период производственной практики.

Наш опыт показывает, что чем раньше студент начинает применять на практике свои теоретические знания, полученные в университете, участвуя в реальном производственном процессе, тем успешнее он адаптируется на производстве и тем эффективнее его профессиональная карьера.

Крынин Лев Иванович

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЮСТИРОВКИ ОБЪЕКТИВОВ ПЕРЕМЕННОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Учебное пособие

В авторской редакции
Компьютерный набор и верстка Шлепаков А.Б.
Дизайн обложки Шлепаков А.Б.
Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного университета
информационных технологий, механики и оптики
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати . . .05.08

Отпечатано на ризографе Тираж 100 экз. Заказ № . . .